BOJAN KRAUT

STROJARSKI PRIRUČNIK

DEVETO HRVATSKO ILI SRPSKO IZDANJE
POTPUNO PRERAĐENO I DOPUNJENO



TEHNIČKA KNJIGA, ZAGREB

Dosadanja izdanja

slovenska izdanja	hrvatska ili srpska izdanja
1954	1956
1964	1963
1967	1965
1973	1970
1976	1975
1981	1976 (1980)**
1981 (A5)*	1982 (1984)**
1987	1986 (1987)**
1987 (A5)*	1988

* Izdanje u A5 formatu. (Sva su druga izdanja bila u A6 formatu.)

** Dotisak

IZ PREDGOVORA PRVOM IZDANJU

Strojarski se stručnjak — bilo inženjer, tehničar ili majstor — u svome radu dnevno susreće s mnogobrojnim, ponajčešće brojčanim podacima.

U nas smo dosad upotrebljavali strane priručnike, no njihova je uporaba ograničena zbog visoke cijene i nedovoljnog znanja stranih jezika. Posebno valja spomenuti da ti priručnici ne pružaju materije na takav način kakav bi bio potreban za našu praksu i — što je najznačajnije — u njima nema domaćih standarda i drugih domaćih propisa.

Da bih barem djelomice popunio tu prazninu, odlučio sam se sastaviti ovaj priručnik.

Priručnik treba da je uvijek pristupačan svagdje i svakome, pa je stoga odabran džepni format. To je dakako ograničilo opseg. Zbog toga sam se pri izboru gradiva odlučio za ono što dnevno treba strojarskim inženjerima, tehničarima ili majstorima, pa i studentima strojarstva i đacima srednjih tehničkih učilišta. Izbor gradiva za tako različite stupnjeve znanja nije bio lak. Želio sam se što više približiti nekoj svima korisnoj sredini. Zato će jednome biti nečega previše, a drugome premalo, jednome će neko poglavlje biti preteško, a drugome prejednostavno.

Jezgra je ovoga priručnika brojčani materijal, jednako potreban za sve stupnjeve naobrazbe, za školu i praksu. Ostalo je gradivo sažeto na najnužnije. Posebnu sam pažnju posvetio razvoju nauke o mjerama i novostima na tom polju, koje zadiru u strojarstvo.

Jednadžbe su veličinske. Time je u nekim područjima omogućena i upotreba još ukorijenjenih sustava mjera — tehničkog i toplinskog (kalorijskog), a u svim područjima sviju tehničkih grana upotreba novoga, apsolutnog sustava po Giorgiju. Teškoće, koje su kočile upotrebu Giorgijeva sustava mjera u toplinskoj tehnici, nastojao sam prebroditi sastavom odgovarajućih toplinskih tablica. U ovom su priručniku prvi put u stručnoj literaturi uopće objavljene više-manje potpune strojarske toplinske tablice, koje sadrže sve vrijednosti preračunane i u jedinice Giorgijeva sustava mjera. Time je i u toplinskoj tehnici bitno olakšano računanje s elegantnijim, veličinskim jednadžbama.

Ljubljana, u travnju 1954.

B. K.

PREDGOVOR DEVETOM HRVATSKOM ILI SRPSKOM IZDANJU

Prvo – slovensko (1954), i zatim drugo – hrvatsko ili srpsko (1956) – izdanje ovoga priručnika bilo je rasprodano u roku od po godinu dana, što je pokazalo kolika je bila potražnja za djelima te vrste naše strojarske literature. Ocjene djela, objavljene u stručnim časopisima ili saopćene osobno, također su potvrdile da su oba izdanja postigla svoj cilj.

Tom prilikom ponovno moramo zahvaliti radnim kolektivima – Titovih zavoda »Litostroj« u Ljubljani i Industrije lokomotiva, strojeva i mostova »Đuro Đaković« u Slavonskom Brodu, koji su kao nakladnici omogućili prvo i drugo izdanje priručnika.

Iskustvom stečenim u prvim izdanjima slijedila su nova, stalno dopunjavana izdanja. Djelo je s dosadašnjih devet slovenskih te devet hrvatskosrpskih izdanja doseglo ukupnu nakladu od 290000 primjeraka. Na taj je način diljem Jugoslavije rašireni priručnik sve više dolazio u upotrebu ne samo na radnim mjestima, već i kao pomagalo pri učenju.

Kako se već razabire iz predgovora prvom izdanju, priručnik je od svoga početka trebao da posluži u dvije glavne svrhe:

- da pomaže strojarskim stručnjacima pri studiju i u praksi – đacima, studentima, tehničarima i inženjerima – mnogim brojčanim podacima iz struke, potebnim pri svakodnevnom radu, i
- da jedinstveno prikaže sve zakonitosti za sve grane strojarstva veličinskim jednadžbama, tj. u prirodnim međusobnim odnosima veličina (što je bio u vrijeme prvog izdanja priručnika prerani i veoma smion zahvat). Stoga je bilo potrebno prijeći na upotrebu koherentnih jedinica.

U vezi s tim priručnik je već u prvom izdanju, g. 1954, upoznao čitaoce sa suvremenim mjernim jedinicama (tada još Giorgijeva sustava jedinica) te objavio i u tim jedinicama preračunane brojčane podatke. Tim jedinicama (sada međunarodnog sustava jedinica SI) posvetio je priručnik posebnu pažnju i u ovom izdanju, koje je potpuno usklađeno s jugoslavenskim zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima.

Osim toga priručnik je u skladu s najnovijim stanjem standardizacije (JUS, ISO, DIN), a dopunjen je i proširen novim poglavljima.

U novom gradivu valja posebno spomenuti: pročišćeno i dopunjeno poglavlje o matematici; potpuno nanovo napisana poglavlja o osnovnim pojmovima s područja regulacije i elektronske obrade podataka; nadopunjeni podaci o plastičnim tvarinama, pregled područja preoblikovanja te korozije i površinske zaštite.

Da se s novim gradivom priručnik ne bi povećao preko priručnog opsega, u tom izdanju su izostale tablice o potencijama i korijenima brojeva (što više nije potrebno zbog široke upotrebe ručnih računala) kao i posebni dodatak o informatici i računarstvu (jer je u priručnik uključeno novo poglavlje s tog područja).

Naročitu zahvalnost dugujem nakladi »Springer Verlag« Berlin-Heidelberg-New York, i univ. prof. dr E. Schmidtu, što su dopustili upotrebu podataka za tablice vodene pare iz djela »Properties of Water and Steam in SI-Units« (1969).

Zahvaljujem Jugoslovenskom zavodu za standardizaciju u Beogradu i ustanovi »Deutscher Normenausschuß« u Berlinu za pristanak i pomoć pri upotrebi brojčanih podataka iz standarda.

Za pomoć pri sastavljanju rukopisa dužan sam zahvaliti u prvom redu dr Jožetu Puharu za mnoge korisne prijedloge, napose pri lančanom i zupčanom prijenosu te tehnološkim postupcima i dr Pavli Mizori-Oblak za neposredno sudjelovanje pri dopunjavanju poglavlja o matematici; umir. prof. Miroslavu Pečorniku za konkretne prijedloge s područja hidromehanike i vlažnog zraka; mr. Dragu Kelšinu za pomoć pri proširenju poglavlja o elektrotehnici, dr Zoranu Karižu za sudjelovanje pri oblikovanju poglavlja o regulaciji, dr Jožetu Duhovniku za predloge o elektronskoj obradi podataka kao i svima drugima koji su mi pomogli korisnim savjetima i upozorenjima.

Toplo zahvaljujem također Anji Baras, za sudjelovanje pri dugotrajnom sastavljanju rukopisa i pažljivom popravljanju otisaka, i Joži Puhar za uzorno izrađene slike.

Zamisao takvog prikaza gradiva da je – zbog boljeg pregleda i veće upotrebljivosti – na jednoj ili dvije susjedne strane sabrano sve što je međusobno tijesno povezano, zahtijevala je mnogo dodatnog rada već pri samom oblikovanju rukopisa, a potom još stalnu i tijesnu suradnju autora sa slagarima.

Tiskara »Ljudske pravice« i njeni radnici strpljivo su ispunjavali mnoge sitne želje autora. Hvala svima!

U Ljubljani, kolovoza 1987 — Bojan Kraut

NAPOMENA PREVODIOCA

Po želji nakladnika i u ovom je izdanju upotrebljena stručna terminologija, uvriježena na Fakultetu za strojarstvo i brodogradnju Sveučilišta u Zagrebu, što je sabrana u Tehničkom rječniku Vlatka Dapca (izd. 1970).

Zbog veoma proširenog gradiva bila mi je potrebna pomoć u terminologiji. Tu su mi pružili: prof. dr ing. B. Ostojić, mr. Lovorka Tomašić i dipl. ing. A. Sok na čemu im se najtoplije zahvaljujem.

Jezično je dotjerivanje preuzeo izdavač.

Rijeka, kolovoza 1987 — Miroslav Pečornik

SADRŽAJ

PRVI DIO

DRUGI DIO

UPUTE
za upotrebu priručnika

1. Pisanje razlomaka s kosom razlomkovom crtom

Zbog skučenog prostora i radi pojednostavnjenja tiskarskog sloga, razlomci su pisani kosom razlomkovom crtom. Pri tome se smatra da se značenje razlomkove crte proteže do prvog znaka plus, minus ili puta:

$$ab/cd = ab/(cd) = (ab)/(cd) = \frac{ab}{cd} \qquad ab/c \cdot d = (ab/c) \cdot d = \frac{ab}{c} d$$

$$(a+b)/(c+d) = \frac{a+b}{c+d} \qquad a + b/c + d = a + \frac{b}{c} + d$$

2. Označivanje vektora

Vektori su u ovom priručniku označeni:

u tekstu — debljim tiskom simbola (***a***)
u slikama — oznakom povrh simbola ($\vec{a}$)

jer bi u tekstu označivanje povrh simbola povećalo grafičke teškoće, dok bi u slikama bilo teško izvedivo razlikovanje između običnog i deblje tiskanog simbola.

3. Označivanje lučne mjere

Da u preračunavanju prema jednadžbama ne bi došlo do zamjene između mjere za kut (°) i lučne mjere (rad), simboli su označeni:

za kut (geometrijski) α
za lučnu mjeru (analitički kut) $\hat{\alpha}$

Osim toga je u svim jednadžbama, gdje se pojavljuje lučna mjera, dodano još upozorenje: $\hat{\alpha}$ (rad).

4. Računanje s veličinskim jednadžbama

U ovom su priručniku u načelu upotrijebljene samo veličinske jednadžbe (vidi str. 53). Pri računanju s veličinskim jednadžbama moraju biti količine svih veličina izražene u k o h e r e n t n i m jedinicama.

Sve SI jedinice su međusobno koherentne. Stoga je pri računanju s veličinskim jednadžbama rezultat uvijek pravilan ako se sve mjeri u jedinicama SI.

Za pregledne, jednostavne veličinske jednadžbe mogu se upotrijebiti i druge koherentne jedinice, ako su prikladnije.

Pri kompliciranim veličinskim jednadžbama izbjegavaju se moguće pogreške isključivom upotrebom jedinica SI. Količinske vrijednosti veličina, zadanih u bilo kojim drugim mjerama, valja stoga ponajprije pretvoriti u jedinice SI.

Pri proračunavanju veličine brojčanim jednadžbama (vidi str. 53) moraju biti zadani za svaku veličinu i podaci o njenoj mjeri.

P r i m j e r i *

a) Brzina $v = s/t$

Za:	
$s = 24\ \mathrm{km}$	$= 24\,000\ \mathrm{m}$
$t = 20\ \mathrm{min} = 0{,}333\ \mathrm{h}$	$= 1\,200\ \mathrm{s}$

je $v = \dfrac{24\,000}{1\,200} = 20\ \mathrm{m/s}$

ili $v = \dfrac{24\ \mathrm{km}}{0{,}333\ \mathrm{h}} = 72\ \mathrm{km/h}$ $(= 20\ \mathrm{m/s})$

b) Čvrstoća $R_m = F_m/S_0$

Za:	
$F_m = 7{,}5\ \mathrm{kN}$	$= 7\,500\ \mathrm{N}$
$S_0 = 20\ \mathrm{mm}^2$	$= 20 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}^2$

je $R_m = \dfrac{7500}{20 \cdot 10^{-6}} = 375 \cdot 10^6\ \mathrm{N/m}^2$ $(= 375\ \mathrm{MPa})$

ili $R_m = \dfrac{7500\ \mathrm{N}}{20\ \mathrm{mm}^2} = 375\ \mathrm{N/mm}^2$ $(= 375\ \mathrm{MPa})$

c) Brzina istjecanja $v_0 = \sqrt{2(gh + \Delta p/\varrho)}$

Za:	
$g = 9{,}81\ \mathrm{m/s}^2$	$= 9{,}81\ \mathrm{m/s}^2$
$h = 510\ \mathrm{cm}$	$= 5{,}1\ \mathrm{m}$
$\Delta p = 2{,}5\ \mathrm{bar}$	$= 2{,}5 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa}$
$\varrho = 1\ \mathrm{kg/dm}^3$	$= 1\,000\ \mathrm{kg/m}^3$

je $v_0 = \sqrt{2(9{,}81 \cdot 5{,}1 + 2{,}5 \cdot 10^5/10^3)} = 24{,}5\ \mathrm{m/s}$

č) Toplinski tok $\Phi = k(T_1 - T_2)A$

Za:	
$k = 100\ \mathrm{W/m^2\,K}$	$= 100\ \mathrm{W/m^2\,K}$
$t_1 = 70\ ^\circ\mathrm{C}$	$T_1 - T_2 = 50\ \mathrm{K}$
$t_2 = 20\ ^\circ\mathrm{C}$	
$A = 200\ \mathrm{dm}^2$	$= 2\ \mathrm{m}^2$

je $\Phi = 100 \cdot 50 \cdot 2 = 10000\ \mathrm{W}$ $(= 10\ \mathrm{kW})$

ć) Prandtlov broj $Pr = \varrho c \nu/\lambda$

Za:	
$\varrho = 0{,}871\ \mathrm{kg/dm}^3$	$= 871\ \mathrm{kg/m}^3$
$c = 1{,}850\ \mathrm{kJ/kg\,K}$	$= 1\,850\ \mathrm{J/kg\,K}$
$\nu = 15{,}0\ \mathrm{mm^2/s}$	$= 15{,}0 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$
$\lambda = 0{,}144\ \mathrm{W/m\,K}$	$= 0{,}144\ \mathrm{W/m\,K}$

je $Pr = \dfrac{871 \cdot 1\,850 \cdot 15{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}144} = 167{,}8$ (—)

* Podaci desno od vertikalne crte su dani u jedinicama SI. – Pri proračunavanju veličinskih jednadžbi jedinicama SI nije potrebna dimenzijska kontrola.

PRVI DIO

MATEMATIKA

Matematički znakovi

$=$	jednako
$\equiv$	istovjetno, identično
$\neq$	nije jednako
$\approx$	približno jednako
$\sim$	slično
$\cong$	sukladno, kongruentno
$\perp$	okomito
$\parallel$	usporedno, paralelno
$\#$	paralelno i jednako
$<$	manje od
$>$	veće od
$\leqq$	manje ili jednako
$\geqq$	veće ili jednako
∞	beskonačno
const	konstantno
$\sphericalangle$	kut
$\frown$	luk
$+$	plus – zbrajanje
$-$	minus – oduzimanje
$\cdot$, $\times$	puta – množenje
:	dijeljenje
—	razlomkova crta
/	kosa razlomkova crta
( )	okrugla zagrada
[ ]	uglata zagrada
{ }	vitičasta zagrada
. . .	od – do
. . . (	od – do isključivo
%	postotak, procent
‰	promil
ppm	dijelovi na miljun (partes pro millione)

$\lvert a \rvert$	apsolutna vrijednost
a^m	a na (potenciju) m
$\sqrt{\ }$	kvadratni korijen
$\sqrt[n]{\ }$	n-ti korijen
$\log_b$	logaritam za bazu b
lg	dekadski logaritam
ln	prirodni logaritam
arc	arkus
sin	sinus
cos	kosinus
tan	tangens
cot	kotangens
!	faktorijela
$\binom{a}{b}$	a povrh b
i	imaginarna jedinica $(i^2 = -1)$
lim	limes
$\rightarrow$	teži k
$f()$	funkcija
Δ	razlika
d	diferencijal
$y' = \dfrac{dy}{dx}$	prva derivacija
$y'' = \dfrac{d^2y}{dx^2}$	druga derivacija
$\dfrac{\partial}{\partial x}$	parcijalna derivacija
$\sum$	suma, zbroj
$\int$	integral
$\hat{a}$, $\boldsymbol{a}$	oznake vektora*

* U ovom su priručniku vektori označeni: $\hat{a}$ – u slikama, $\boldsymbol{a}$ – u tekstu (iz tiskarskih razloga).

Posebni matematički znakovi

$\in$ je element skupa	($a \in A$: a je element skupa A)
$\notin$ nije element skupa	($b \notin A$: b nije element skupa A)
$\subset$ sadržan u skupu	($A \subset B$: skup A sadržan je u skupu B)
$\cup$ unija skupova	($A \cup B$: unija skupova A i B sadrži sve elemente, koji su u skupovima A ili B)
$\cap$ presjek skupova	($A \cap B$: presjek skupova A i B sadrži sve one elemente, koji su ujedno u skupovima A i B)

*

∇ nabla (Hamiltonov operator deriviranja) Δ Laplaceov operator

*

N prirodni brojevi **N** $= \{1, 2, 3, \ldots\}$

Z cijeli brojevi **Z** $= \{0, 1, -1, 2, -2, \ldots\}$

R realni brojevi (racionalna i iracionalni brojevi)

Q racionalni brojevi (razlomci) **Q** $= \{m/n;\ m, n \in$ **Z**$;\ n \neq 0\}$

Iracionalni su svi realni brojevi koji nisu racionalni (mogu se prikazati kao neperiodiski beskonačni decimalni razlomci), npr. $\sqrt{2}$, π, e

C kompleksni brojevi **C** $= a + bi$

i – imaginarna jedinica ($i^2 = -1$)

a – realna komponenta, b – imaginarna komponenta $\Big\}$ $a, b \in$ **R**

Važne vrijednosti

Ludolfov broj: $\pi = 3{,}141\,592\ (6535\ldots)$ ($\approx 22/7$, $\approx 355/113$)

$2\pi = 6{,}283\,185\ldots$	$\pi^2 = 9{,}869\,604\ldots$	$2/\pi = 0{,}636\,620\ldots$
$3\pi = 9{,}424\,778\ldots$	$\sqrt{\pi} = 1{,}772\,454\ldots$	$3/\pi = 0{,}954\,930\ldots$
$4\pi = 12{,}566\,371\ldots$	$\sqrt{2\pi} = 2{,}506\,628\ldots$	$4/\pi = 1{,}273\,240\ldots$
$\pi/2 = 1{,}570{,}796\ldots$	$1/\pi = 0{,}318\,310\ldots$	$6/\pi = 1{,}909\,859\ldots$
$\pi/3 = 1{,}047\,197\ldots$	$1/2\pi = 0{,}159\,155\ldots$	$1/\pi^2 = 0{,}101\,321\ldots$
$\pi/4 = 0{,}785\,398\ldots$	$1/3\pi = 0{,}106\,103\ldots$	$\sqrt{1/\pi} = 0{,}564\,190\ldots$
$\pi/6 = 0{,}523\,599\ldots$	$1/4\pi = 0{,}079\,577\ldots$	$\sqrt{1/2\pi} = 0{,}398\,942\ldots$

$\ln\pi = 1{,}144\,730\ldots$ $\lg\pi = 0{,}497\,149\ldots$

*

Eulerov broj: $e = 2{,}718\,282\ldots$ (Osnova prirodnih logaritama)

$e^2 = 7{,}389\,056\ldots$	$\sqrt[3]{e} = 1{,}395\,612\ldots$	$1/e^2 = 0{,}135\,335\ldots$
$\sqrt{e} = 1{,}648\,721\ldots$	$1/e = 0{,}367\,879\ldots$	$\sqrt{1/e} = 0{,}606\,531\ldots$
	$\lg e = 0{,}434\,294\ldots$	

RAČUNANJE S POTENCIJAMA I KORIJENIMA

Potencije

$a^n = a \cdot a \cdot a \ldots$ (n-puta)
a – osnova, baza
n – eksponent

$a^0 = 1 \quad a \neq 0$

$a^1 = a$

Korijeni

$\sqrt[n]{a} = a^{1/n}$
a – radikand
n – korijenski eksponent

$\sqrt[1]{a} = a$

$$\lim_{n \to \infty} a^n = \begin{matrix} 0 & \text{za} & 0 < a < 1 \\ \infty & \text{za} & a > 1 \end{matrix}$$

Taki eksponenti ($a > 0$)

$(\pm a)^{2n} = +a^{2n}$

$\sqrt[2n]{+a} = \sqrt[2n]{a}$

$\sqrt[2n]{-a} = \mathrm{i}\sqrt[2n]{a}$

Lihi eksponenti ($a > 0$)

$(\pm a)^{2n+1} = \pm a^{2n+1}$

$\sqrt[2n+1]{\pm a} = \pm\sqrt[2n+1]{a}$

*

$a^{-n} = \dfrac{1}{a^n}$ $\qquad a^{-1/n} = \dfrac{1}{\sqrt[n]{a}}$

$a^{mn} = (a^m)^n = (a^n)^m$ $\qquad a^{m/n} = \sqrt[n]{a^m} = \left(\sqrt[n]{a}\right)^m$

$a^m a^n = a^{m+n}$

$\dfrac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$ $\qquad \sqrt[m]{\sqrt[n]{a}} = (a^{1/n})^{1/m} = a^{1/mn} = \sqrt[mn]{a}$

$a^n b^n = (ab)^n$ $\qquad \sqrt[n]{a}\,\sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{ab}$

$\dfrac{a^n}{b^n} = \left(\dfrac{a}{b}\right)^n$ $\qquad \dfrac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}} = \sqrt[n]{\dfrac{a}{b}}$

*

$0^n = 0$ $\qquad \sqrt[n]{0} = 0$

$\lim\limits_{n \to 0} \dfrac{1}{n} = \infty$ $\qquad \lim\limits_{n \to \infty} \dfrac{1}{n} = 0$

Neodređeni izrazi: 1^∞, 0^0, ∞^0, $0/0$, ∞/∞, $0 \cdot \infty$, $\infty - \infty$

LOGARITMI

Logaritmiranje je računska operacija, pri kojoj tražimo eksponent b iz poznate potencije c i baze a

$$a^b = c$$

Broj b je logaritam broja c za bazu a

$$b = \log_a c$$

(gdje su a i c pozitivni brojevi).

Za bilo koju bazu $a > 0$, $a \neq 1$ vrijedi:

$$\log_a a = 1$$
$$\log_a 1 = 0$$

$$\lim_{x \to 0} \log x = \begin{cases} -\infty & \text{za} \quad a > 1 \\ +\infty & \text{za} \quad 0 < a < 1 \end{cases}$$

$$\lim_{x \to \infty} \log x = \begin{cases} +\infty & \text{za} \quad a > 1 \\ -\infty & \text{za} \quad 0 < a < 1 \end{cases}$$

Računanje s logaritmima

$$\log_a (uv) = \log_a u + \log_a v$$
$$\log_a \frac{u}{v} = \log_a u - \log_a v$$
$$\log_a u^v = v \log_a u$$
$$\log_a \sqrt[v]{u} = \frac{1}{v} \log_a u$$

Primjer

$$\log \frac{2a^3\sqrt{b}}{3c^2 d} = \log(2a^3\sqrt{b}) - \log(3c^2 d) =$$
$$= \log 2 + 3\log a + \frac{1}{2}\log b - \log 3 - 2\log c - \log d$$

*

Pretvaranje logaritama

$$\log_a u = M \log_b u \qquad (M \text{ je modul pretvorbe})$$

U upotrebi su dekadski (Briggsovi) logaritmi s bazom $a = 10$ i prirodni logaritmi s bazom $a = e$ (e = 2,718282...)

Dekadski (Briggsovi) logaritmi

imaju bazu $a = 10$

Označujemo ih $\qquad \log_{10} u = \lg u$

npr. $\qquad \lg 10 = 1 \qquad \lg 10^n = n$

Svaki se dekadski logaritam sastoji od:

a) karakteristike (cijelog broja u logaritmu), tj. potencije broja 10, koja odgovara mjesnoj vrijednosti prve brojke u danom broju u;

b) mantise (decimale u logaritmu), koju za redoslijed brojaka u danom broju u potražimo u tablicama na str. 6 i 7.

Primer:

u	Karakteristika	Mantisa	$\lg u$
642	$\lg 10^2 = 2$	,8075	2,8075
64,2	$\lg 10^1 = 1$	(iz tablica	1,8075
6,42	$\lg 10^0 = 0$	za redoslije	0,8075
0,642	$\lg 10^{-1} = -1$	brojaka 642)	0,8075 − 1
0,0642	$\lg 10^{-2} = -2$		0,8075 − 2

Prirodni logaritmi

imaju bazu $a = e = 2{,}718282\ldots$

Označujemo ih $\qquad \log_e u = \ln u$

npr. $\qquad \ln e = 1 \qquad \ln e^n = n$

*

Odnos dekadskih i prirodnih logaritama

$$\lg u = 0{,}4343 \ln u \qquad \ln u = 2{,}3026 \lg u$$

Izračunavanje prirodnih logaritama iz dekadskih

$$\ln 6{,}42 = 2{,}3026 \cdot \lg 6{,}42 = 2{,}3026 \cdot 0{,}8075 = 1{,}8593$$

*

Prirodni logaritmi brojeva od 100 do 999 sabrani su u tablicama na str. 8 i 9. Za sve se druge brojeve izračunavaju pomoću

$$\ln 10 = 2{,}3026 \text{ i } \ln 10^n = 2{,}3026\, n$$

npr. $\qquad \ln 642 = 6{,}4646$ (iz tablica)

$$\ln 6{,}42 = \ln (642/100) = \ln 642 - \ln 10^2 = 6{,}4646 - 2 \cdot 2{,}3026 = 1{,}8594$$

Mantise dekadskih logaritama 100 ... 549

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0294	0334	0374
11.	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755
12.	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106
13.	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430
14.	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732
15.	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014
16.	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279
17.	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529
18.	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765
19.	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989
20.	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201
21.	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404
22.	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598
23.	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784
24.	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962
25.	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133
26.	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298
27.	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456
28.	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609
29.	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757
30.	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900
31.	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038
32.	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172
33.	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302
34.	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428
35.	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551
36.	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670
37.	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786
38.	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899
39.	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010
40.	6021	6031	6042	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117
41.	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222
42.	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325
43.	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425
44.	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522
45.	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618
46.	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712
47.	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803
48.	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893
49.	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981
50.	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067
51.	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152
52.	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235
53.	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316
54.	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396

Mantise dekadskih logaritama 550 ... 999

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
55.	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474
56.	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551
57.	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627
58.	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701
59.	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774
60.	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846
61.	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917
62.	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987
63.	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055
64.	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122
65.	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189
66.	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254
67.	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8399	8306	8312	8319
68.	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382
69.	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445
70.	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506
71.	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567
72.	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627
73.	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686
74.	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745
75.	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802
76.	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859
77.	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915
78.	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971
79.	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025
80.	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079
81.	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133
82.	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186
83.	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238
84.	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289
85.	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340
86.	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390
87.	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440
88.	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489
89.	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538
90.	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586
91.	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633
92.	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680
93.	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727
94.	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773
95.	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818
96.	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863
97.	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908
98.	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952
99.	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996

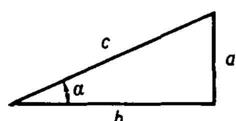
Prirodni logaritmi brojeva od 100 do 549

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.	4,6052	4,6151	4,6250	4,6347	4,6444	4,6540	4,6634	4,6728	4,6821	4,6913
11.	4,7005	4,7095	4,7185	4,7274	4,7362	4,7449	4,7536	4,7622	4,7707	4,7791
12.	4,7875	4,7958	4,8040	4,8122	4,8203	4,8283	4,8363	4,8442	4,8520	4,8598
13.	4,8675	4,8752	4,8828	4,8903	4,8978	4,9053	4,9127	4,9200	4,9273	4,9345
14.	4,9416	4,9488	4,9558	4,9628	4,9698	4,9767	4,9836	4,9904	4,9972	5,0039
15.	5,0106	5,0173	5,0239	5,0304	5,0370	5,0434	5,0499	5,0562	5,0626	5,0689
16.	5,0752	5,0814	5,0876	5,0938	5,0999	5,1059	5,1120	5,1180	5,1240	5,1299
17.	5,1358	5,1417	5,1475	5,1533	5,1591	5,1648	5,1705	5,1761	5,1818	5,1874
18.	5,1930	5,1985	5,2040	5,2095	5,2149	5,2204	5,2257	5,2311	5,2364	5,2417
19.	5,2470	5,2523	5,2575	5,2627	5,2679	5,2730	5,2781	5,2832	5,2883	5,2933
20.	5,2983	5,3033	5,3083	5,3132	5,3181	5,3230	5,3279	5,3327	5,3375	5,3423
21.	5,3471	5,3519	5,3566	5,3613	5,3660	5,3706	5,3753	5,3799	5,3845	5,3891
22.	5,3936	5,3982	5,4027	5,4072	5,4116	5,4161	5,4205	5,4250	5,4293	5,4337
23.	5,4381	5,4424	5,4467	5,4510	5,4553	5,4596	5,4638	5,4681	5,4723	5,4765
24.	5,4806	5,4848	5,4889	5,4931	5,4972	5,5013	5,5053	5,5094	5,5134	5,5175
25.	5,5215	5,5255	5,5294	5,5334	5,5373	5,5413	5,5452	5,5491	5,5530	5,5568
26.	5,5607	5,5645	5,5683	5,5722	5,5759	5,5797	5,5835	5,5872	5,5910	5,5947
27.	5,5984	5,6021	5,6058	5,6095	5,6131	5,6168	5,6204	5,6240	5,6276	5,6312
28.	5,6348	5,6384	5,6419	5,6454	5,6490	5,6525	5,6560	5,6595	5,6630	5,6664
29.	5,6699	5,6733	5,6768	5,6802	5,6836	5,6870	5,6904	5,6937	5,6971	5,7004
30.	5,7038	5,7071	5,7104	5,7137	5,7170	5,7203	5,7236	5,7268	5,7301	5,7333
31.	5,7366	5,7398	5,7430	5,7462	5,7494	5,7526	5,7557	5,7589	5,7621	5,7652
32.	5,7683	5,7714	5,7746	5,7777	5,7807	5,7838	5,7869	5,7900	5,7930	5,7961
33.	5,7991	5,8021	5,8051	5,8081	5,8111	5,8141	5,8171	5,8201	5,8230	5,8260
34.	5,8289	5,8319	5,8348	5,8377	5,8406	5,8435	5,8464	5,8493	5,8522	5,8551
35.	5,8579	5,8608	5,8636	5,8665	5,8693	5,8721	5,8749	5,8777	5,8805	5,8833
36.	5,8861	5,8889	5,8916	5,8944	5,8972	5,8999	5,9026	5,9054	5,9081	5,9108
37.	5,9135	5,9162	5,9189	5,9216	5,9243	5,9269	5,9296	5,9322	5,9349	5,9375
38.	5,9402	5,9428	5,9454	5,9480	5,9506	5,9532	5,9558	5,9584	5,9610	5,9636
39.	5,9661	5,9687	5,9713	5,9738	5,9764	5,9789	5,9814	5,9839	5,9865	5,9890
40.	5,9915	5,9940	5,9965	5,9989	6,0014	6,0039	6,0064	6,0088	6,0113	6,0137
41.	6,0162	6,0186	6,0210	6,0234	6,0259	6,0283	6,0307	6,0331	6,0355	6,0379
42.	6,0403	6,0426	6,0450	6,0474	6,0497	6,0521	6,0544	6,0568	6,0591	6,0615
43.	6,0638	6,0661	6,0684	6,0707	6,0730	6,0753	6,0776	6,0799	6,0822	6,0845
44.	6,0868	6,0890	6,0913	6,0936	6,0958	6,0981	6,1003	6,1026	6,1048	6,1070
45.	6,1092	6,1115	6,1137	6,1159	6,1181	6,1203	6,1225	6,1247	6,1269	6,1291
46.	6,1312	6,1334	6,1356	6,1377	6,1399	6,1420	6,1442	6,1463	6,1485	6,1506
47.	6,1527	6,1549	6,1570	6,1591	6,1612	6,1633	6,1654	6,1675	6,1696	6,1717
48.	6,1738	6,1759	6,1779	6,1800	6,1821	6,1841	6,1862	6,1883	6,1903	6,1924
49.	6,1944	6,1964	6,1985	6,2005	6,2025	6,2046	6,2066	6,2086	6,2106	6,2126
50.	6,2146	6,2166	6,2186	6,2206	6,2226	6,2246	6,2265	6,2285	6,2305	6,2324
51.	6,2344	6,2364	6,2383	6,2403	6,2422	6,2442	6,2461	6,2480	6,2500	6,2519
52.	6,2538	6,2558	6,2577	6,2596	6,2615	6,2634	6,2653	6,2672	6,2691	6,2710
53.	6,2729	6,2748	6,2766	6,2785	6,2804	6,2823	6,2841	6,2860	6,2879	6,2897
54.	6,2916	6,2934	6,2953	6,2971	6,2989	6,3008	6,3026	6,3044	6,3063	6,3081

Prirodni logaritmi brojeva od 550 do 999

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
55.	6,3099	6,3117	6,3135	6,3154	6,3172	6,3190	6,3208	6,3226	6,3244	6,3261
56.	6,3279	6,3297	6,3315	6,3333	6,3351	6,3368	6,3386	6,3404	6,3421	6,3439
57.	6,3456	6,3474	6,3491	6,3509	6,3526	6,3544	6,3561	6,3578	6,3596	6,3613
58.	6,3630	6,3648	6,3665	6,3682	6,3699	6,3716	6,3733	6,3750	6,3767	6,3784
59.	6,3801	6,3818	6,3835	6,3852	6,3869	6,3886	6,3902	6,3919	6,3936	6,3953
60.	6,3969	6,3986	6,4003	6,4019	6,4036	6,4052	6,4069	6,4085	6,4102	6,4118
61.	6,4135	6,4151	6,4167	6,4184	6,4200	6,4216	6,4232	6,4249	6,4265	6,4281
62.	6,4297	6,4313	6,4329	6,4345	6,4362	6,4378	6,4394	6,4409	6,4425	6,4441
63.	6,4457	6,4473	6,4489	6,4505	6,4520	6,4536	6,4552	6,4568	6,4583	6,4599
64.	6,4615	6,4630	6,4646	6,4661	6,4677	6,4693	6,4708	6,4723	6,4739	6,4754
65.	6,4770	6,4785	6,4800	6,4816	6,4831	6,4846	6,4862	6,4877	6,4892	6,4907
66.	6,4922	6,4938	6,4953	6,4968	6,4983	6,4998	6,5013	6,5028	6,5043	6,5058
67.	6,5073	6,5088	6,5103	6,5117	6,5132	6,5147	6,5162	6,5177	6,5191	6,5206
68.	6,5221	6,5236	6,5250	6,5265	6,5280	6,5294	6,5309	6,5323	6,5338	6,5352
69.	6,5367	6,5381	6,5396	6,5410	6,5425	6,5439	6,5453	6,5468	6,5482	6,5497
70.	6,5511	6,5525	6,5539	6,5554	6,5568	6,5582	6,5596	6,5610	6,5624	6,5639
71.	6,5653	6,5667	6,5681	6,5695	6,5709	6,5723	6,5737	6,5751	6,5765	6,5779
72.	6,5793	6,5806	6,5820	6,5834	6,5848	6,5862	6,5876	6,5889	6,5903	6,5917
73.	6,5930	6,5944	6,5958	6,5971	6,5985	6,5992	6,6012	6,6026	6,6039	6,6053
74.	6,6067	6,6080	6,6093	6,6107	6,6120	6,6134	6,6147	6,6161	6,6174	6,6187
75.	6,6201	6,6214	6,6227	6,6241	6,6254	6,6267	6,6280	6,6294	6,6307	6,6320
76.	6,6333	6,6346	6,6359	6,6373	6,6386	6,6399	6,6412	6,6425	6,6438	6,6451
77.	6,6464	6,6477	6,6490	6,6503	6,6516	6,6529	6,6542	6,6554	6,6567	6,6580
78.	6,6593	6,6606	6,6619	6,6631	6,6644	6,6657	6,6670	6,6682	6,6695	6,6708
79.	6,6720	6,6733	6,6746	6,6758	6,6771	6,6783	6,6796	6,6809	6,6821	6,6834
80.	6,6846	6,6859	6,6871	6,6884	6,6896	6,6908	6,6921	6,6933	6,6946	6,6958
81.	6,6970	6,6983	6,6995	6,7007	6,7020	6,7032	6,7044	6,7056	6,7069	6,7081
82.	6,7093	6,7105	6,7117	6,7130	6,7142	6,7154	6,7166	6,7178	6,7190	6,7202
83.	6,7214	6,7226	6,7238	6,7250	6,7262	6,7274	6,7286	6,7298	6,7310	6,7322
84.	6,7334	6,7346	6,7358	6,7370	6,7382	6,7393	6,7405	6,7417	6,7429	6,7441
85.	6,7452	6,7464	6,7476	6,7488	6,7499	6,7511	6,7523	6,7534	6,7546	6,7558
86.	6,7569	6,7581	6,7593	6,7604	6,7616	6,7627	6,7639	6,7650	6,7662	6,7673
87.	6,7685	6,7696	6,7708	6,7719	6,7731	6,7742	6,7754	6,7765	6,7776	6,7788
88.	6,7799	6,7811	6,7822	6,7833	6,7845	6,7856	6,7867	6,7878	6,7890	6,7901
89.	6,7912	6,7923	6,7935	6,7946	6,7957	6,7968	6,7979	6,7991	6,8002	6,8013
90.	6,8024	6,8035	6,8046	6,8057	6,8068	6,8079	6,8090	6,8101	6,8112	6,8123
91.	6,8134	6,8145	6,8156	6,8167	6,8178	6,8189	6,8200	6,8211	6,8222	6,8233
92.	6,8244	6,8255	6,8256	6,8276	6,8287	6,8298	6,8309	6,8320	6,8330	6,8341
93.	6,8352	6,8363	6,8373	6,8384	6,8395	6,8405	6,8416	6,8427	6,8437	6,8448
94.	6,8459	6,8469	6,8480	6,8491	6,8501	6,8512	6,8522	6,8533	6,8544	6,8554
95.	6,8565	6,8575	6,8586	6,8596	6,8607	6,8617	6,8628	6,8638	6,8648	6,8659
96.	6,8669	6,8680	6,8690	6,8701	6,8711	6,8721	6,8732	6,8742	6,8752	6,8763
97.	6,8773	6,8783	6,8794	6,8804	6,8814	6,8824	6,8835	6,8845	6,8855	6,8865
98.	6,8876	6,8886	6,8896	6,8906	6,8916	6,8926	6,8937	6,8947	6,8957	6,8967
99.	6,8977	6,8987	6,8997	6,9007	6,9017	6,9027	6,9037	6,9047	6,9057	6,9068

TRIGONOMETRIJSKE FUNKCIJE



U pravokutnom su trokutu:
k a t e t e – stranice a i b uz pravi kut,
h i p o t e n u z a – stranica c nasuprot pravom kutu.

Trigonometrijske funkcije kuta α su omjeri stranica pravokutnog trokuta:

sinus $\sin\alpha = a/c$ tangens $\tan\alpha = a/b$
kosinus $\cos\alpha = b/c$ kotangens $\cot\alpha = b/a$

Vrijednosti trigonometrijskih funkcija kutova od 0° do 90° sabrane su u tablicama: za sin i cos na str. 12 i 13, a za tan i cot na str. 14 in 15.

Vrijednosti trigonometrijskih funkcija češće potrebnih kutova

$\alpha =$ ° / rad	0° / 0	30° / $\pi/6$	45° / $\pi/4$	60° / $\pi/3$	90° / $\pi/2$	180° / π	270° / $3\pi/2$	360° / 2π
$\sin\alpha =$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	1	0	-1	0
$\cos\alpha =$	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	1
$\tan\alpha =$	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}$	$\pm\infty$	0	$\pm\infty$	0
$\cot\alpha =$	$\pm\infty$	$\sqrt{3}$	1	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	0	$\pm\infty$	0	$\pm\infty$

Trigonometrijske funkcije u različitim područjima kutova

$\varphi =$ ° / rad	$\pm\alpha$ / $\pm\alpha$	$90°\pm\alpha$ / $(\pi/2)\pm\alpha$	$180°\pm\alpha$ / $\pi\pm\alpha$	$270°\pm\alpha$ / $(3\pi/2)\pm\alpha$	$360°\pm\alpha$ / $2\pi\pm\alpha$
$\sin\varphi =$	$\pm\sin\alpha$	$+\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$
$\cos\varphi =$	$+\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$	$+\cos\alpha$
$\tan\varphi =$	$\pm\tan\alpha$	$\mp\cot\alpha$	$\pm\tan\alpha$	$\mp\cot\alpha$	$\pm\tan\alpha$
$\cot\varphi =$	$\pm\cot\alpha$	$\mp\tan\alpha$	$\pm\cot\alpha$	$\mp\tan\alpha$	$\pm\cot\alpha$

Osnovni odnosi trigonometrijskih funkcija

$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$ $\sin\alpha = \sqrt{1-\cos^2\alpha}$
$\tan\alpha = \sin\alpha/\cos\alpha$ $\cos\alpha = \sqrt{1-\sin^2\alpha}$
$\cot\alpha = \cos\alpha/\sin\alpha$ $1+\tan^2\alpha = 1/\cos^2\alpha$
$\tan\alpha\cot\alpha = 1$ $1+\cot^2\alpha = 1/\sin^2\alpha$

Trigonometrijske funkcije dvaju kutova

$$\sin(\alpha\pm\beta) = \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\beta$$
$$\cos(\alpha\pm\beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta$$
$$\tan(\alpha\pm\beta) = \frac{\tan\alpha\pm\tan\beta}{1\mp\tan\alpha\tan\beta}$$
$$\cot(\alpha\pm\beta) = \frac{\cot\alpha\cot\beta\mp 1}{\cot\beta\pm\cot\alpha}$$

Za $\alpha = \beta$ vrijedi:

$$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$$
$$\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha$$
$$\tan 2\alpha = 2\tan\alpha/(1-\tan^2\alpha)$$
$$\cot 2\alpha = (\cot^2\alpha - 1)/2\cot\alpha$$

Nadalje vrijedi:

$$\sin 3\alpha = 3\sin\alpha - 4\sin^3\alpha$$
$$\cos 3\alpha = 4\cos^3\alpha - 3\cos\alpha$$
$$2\sin^2\alpha = 1 - \cos 2\alpha$$
$$2\cos^2\alpha = 1 + \cos 2\alpha$$

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$
$$\sin\alpha - \sin\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$
$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$
$$\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$
$$\tan\alpha \pm \tan\beta = \frac{\sin(\alpha\pm\beta)}{\cos\alpha\cos\beta}$$
$$\cot\alpha \pm \cot\beta = \frac{\sin(\beta\pm\alpha)}{\sin\alpha\sin\beta}$$

$$2\sin\alpha\sin\beta = -\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$$
$$2\sin\alpha\cos\beta = \sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)$$
$$2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$$

Trigonometrijske funkcije: sinus od 0° do 45°, kosinus od 45° do 90°

	sin α							
α	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0°	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01454	0,01745	**89°**
1°	0,01745	0,02036	0,02327	0,02618	0,02908	0,03199	0,03490	**88°**
2°	0,03490	0,03781	0,04071	0,04362	0,04653	0,04943	0,05234	**87°**
3°	0,05234	0,05524	0,05814	0,06105	0,06395	0,06685	0,06976	**86°**
4°	0,06976	0,07266	0,07556	0,07846	0,08136	0,08426	0,08716	**85°**
5°	0,08716	0,09005	0,09295	0,09585	0,09874	0,10164	0,10453	**84°**
6°	0,10453	0,10742	0,11031	0,11320	0,11609	0,11898	0,12187	**83°**
7°	0,12187	0,12476	0,12764	0,13053	0,13341	0,13629	0,13917	**82°**
8°	0,13917	0,14205	0,14493	0,14781	0,15069	0,15356	0,15643	**81°**
9°	0,15643	0,15931	0,16218	0,16505	0,16792	0,17078	0,17365	**80°**
10°	0,17365	0,17651	0,17937	0,18224	0,18509	0,18795	0,19081	**79°**
11°	0,19081	0,19366	0,19652	0,19937	0,20222	0,20507	0,20791	**78°**
12°	0,20791	0,21076	0,21360	0,21644	0,21928	0,22212	0,22495	**77°**
13°	0,22495	0,22778	0,23062	0,23345	0,23627	0,23910	0,24192	**76°**
14°	0,24192	0,24474	0,24756	0,25038	0,25320	0,25601	0,25882	**75°**
15°	0,25882	0,26163	0,26443	0,26724	0,27004	0,27284	0,27564	**74°**
16°	0,27564	0,27843	0,28123	0,28402	0,28680	0,28959	0,29237	**73°**
17°	0,29237	0,29515	0,29793	0,30071	0,30348	0,30625	0,30902	**72°**
18°	0,30902	0,31178	0,31454	0,31730	0,32006	0,32282	0,32557	**71°**
19°	0,32557	0,32832	0,33106	0,33381	0,33655	0,33929	0,34202	**70°**
20°	0,34202	0,34475	0,34748	0,35021	0,35293	0,35565	0,35837	**69°**
21°	0,35837	0,36108	0,36379	0,36650	0,36921	0,37191	0,37461	**68°**
22°	0,37461	0,37730	0,37999	0,38268	0,38537	0,38805	0,39073	**67°**
23°	0,39073	0,39341	0,39608	0,39875	0,40141	0,40408	0,40674	**66°**
24°	0,40674	0,40939	0,41204	0,41469	0,41734	0,41998	0,42262	**65°**
25°	0,42262	0,42525	0,42788	0,43051	0,43313	0,43575	0,43837	**64°**
26°	0,43837	0,44098	0,44359	0,44620	0,44880	0,45140	0,45399	**63°**
27°	0,45399	0,45658	0,45917	0,46175	0,46433	0,46690	0,46947	**62°**
28°	0,46947	0,47204	0,47460	0,47716	0,47971	0,48226	0,48481	**61°**
29°	0,48481	0,48735	0,48989	0,49242	0,49495	0,49748	0,50000	**60°**
30°	0,50000	0,50252	0,50503	0,50754	0,51004	0,51254	0,51504	**59°**
31°	0,51504	0,51753	0,52002	0,52250	0,52498	0,52745	0,52992	**58°**
32°	0,52992	0,53238	0,53484	0,53730	0,53975	0,54220	0,54464	**57°**
33°	0,54464	0,54708	0,54951	0,55194	0,55436	0,55678	0,55919	**56°**
34°	0,55919	0,56160	0,56401	0,56641	0,56880	0,57119	0,57358	**55°**
35°	0,57358	0,57596	0,57833	0,58070	0,58307	0,58543	0,58779	**54°**
36°	0,58779	0,59014	0,59248	0,59482	0,59716	0,59949	0,60182	**53°**
37°	0,60182	0,60414	0,60645	0,60876	0,61107	0,61337	0,61566	**52°**
38°	0,61566	0,61795	0,62024	0,62251	0,62479	0,62706	0,62932	**51°**
39°	0,62932	0,63158	0,63383	0,63608	0,63832	0,64056	0,64279	**50°**
40°	0,64279	0,64501	0,64723	0,64945	0,65166	0,65386	0,65606	**49°**
41°	0,65606	0,65825	0,66044	0,66262	0,66480	0,66697	0,66913	**48°**
42°	0,66913	0,67129	0,67344	0,67559	0,67773	0,67987	0,68200	**47°**
43°	0,68200	0,68412	0,68624	0,68835	0,69046	0,69256	0,69466	**46°**
44°	0,69466	0,69675	0,69883	0,70091	0,70298	0,70505	0,70711	**45°**
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	α
	cos α							

Trigonometrijske funkcije: sinus od 45° do 90°, kosinus od 0° do 45°

	sin α							
α	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
45°	0,70711	0,70916	0,71121	0,71325	0,71529	0,71732	0,71934	**44°**
46°	0,71934	0,72136	0,72337	0,72537	0,72737	0,72937	0,73135	**43°**
47°	0,73135	0,73333	0,73531	0,73728	0,73924	0,74120	0,74314	**42°**
48°	0,74314	0,74509	0,74703	0,74896	0,75088	0,75280	0,75471	**41°**
49°	0,75471	0,75661	0,75851	0,76041	0,76229	0,76417	0,76604	**40°**
50°	0,76604	0,76791	0,76977	0,77162	0,77347	0,77531	0,77715	**39°**
51°	0,77715	0,77897	0,78079	0,78261	0,78442	0,78622	0,78801	**38°**
52°	0,78801	0,78980	0,79158	0,79335	0,79512	0,79688	0,79864	**37°**
53°	0,79864	0,80038	0,80212	0,80386	0,80558	0,80730	0,80902	**36°**
54°	0,80902	0,81072	0,81242	0,81412	0,81580	0,81748	0,81915	**35°**
55°	0,81915	0,82082	0,82248	0,82413	0,82577	0,82741	0,82904	**34°**
56°	0,82904	0,83066	0,83228	0,83389	0,83549	0,83708	0,83867	**33°**
57°	0,83867	0,84025	0,84182	0,84339	0,84495	0,84650	0,84805	**32°**
58°	0,84805	0,84959	0,85112	0,85264	0,85416	0,85567	0,85717	**31°**
59°	0,85717	0,85866	0,86015	0,86163	0,86310	0,86457	0,86603	**30°**
60°	0,86603	0,86748	0,86892	0,87036	0,87178	0,87321	0,87462	**29°**
61°	0,87462	0,87603	0,87743	0,87882	0,88020	0,88158	0,88295	**28°**
62°	0,88295	0,88431	0,88566	0,88701	0,88835	0,88968	0,89101	**27°**
63°	0,89101	0,89232	0,89363	0,89493	0,89623	0,89752	0,89879	**26°**
64°	0,89879	0,90007	0,90133	0,90259	0,90383	0,90507	0,90631	**25°**
65°	0,90631	0,90753	0,90875	0,90996	0,91116	0,91236	0,91355	**24°**
66°	0,91355	0,91472	0,91590	0,91706	0,91822	0,91936	0,92050	**23°**
67°	0,92050	0,92164	0,92276	0,92388	0,92499	0,92609	0,92718	**22°**
68°	0,92718	0,92827	0,92935	0,93042	0,93148	0,93253	0,93358	**21°**
69°	0,93358	0,93462	0,93565	0,93667	0,93769	0,93869	0,93969	**20°**
70°	0,93969	0,94068	0,94167	0,94264	0,94361	0,94457	0,94552	**19°**
71°	0,94552	0,94646	0,94740	0,94832	0,94924	0,95015	0,95106	**18°**
72°	0,95106	0,95195	0,95284	0,95372	0,95459	0,95545	0,95630	**17°**
73°	0,95630	0,95715	0,95799	0,95882	0,95964	0,96046	0,96126	**16°**
74°	0,96126	0,96206	0,96285	0,96363	0,96440	0,96517	0,96593	**15°**
75°	0,96593	0,96667	0,96742	0,96815	0,96887	0,96959	0,97030	**14°**
76°	0,97030	0,97100	0,97169	0,97237	0,97304	0,97371	0,97437	**13°**
77°	0,97437	0,97502	0,97566	0,97630	0,97692	0,97754	0,97815	**12°**
78°	0,97815	0,97875	0,97934	0,97992	0,98050	0,98107	0,98163	**11°**
79°	0,98163	0,98218	0,98272	0,98325	0,98378	0,98430	0,98481	**10°**
80°	0,98481	0,98531	0,98580	0,98629	0,98676	0,98723	0,98769	**9°**
81°	0,98769	0,98814	0,98858	0,98902	0,98944	0,98986	0,99027	**8°**
82°	0,99027	0,99067	0,99106	0,99144	0,99182	0,99219	0,99255	**7°**
83°	0,99255	0,99290	0,99324	0,99357	0,99390	0,99421	0,99452	**6°**
84°	0,99452	0,99482	0,99511	0,99540	0,99567	0,99594	0,99619	**5°**
85°	0,99619	0,99644	0,99668	0,99692	0,99714	0,99736	0,99756	**4°**
86°	0,99756	0,99776	0,99795	0,99813	0,99831	0,99847	0,99863	**3°**
87°	0,99863	0,99878	0,99892	0,99905	0,99917	0,99929	0,99939	**2°**
88°	0,99939	0,99949	0,99958	0,99966	0,99973	0,99979	0,99985	**1°**
89°	0,99985	0,99989	0,99993	0,99996	0,99998	1,00000	1,00000	**0°**
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	α
	cos α							

Trigonometrijske funkcije: tangens od 0° do 45°, kotangens od 45° do 90°

	tan α							
α	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0°	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01455	0,01746	**89°**
1°	0,01746	0,02036	0,02328	0,02619	0,02910	0,03201	0,03492	**88°**
2°	0,03492	0,03783	0,04075	0,04366	0,04658	0,04949	0,05241	**87°**
3°	0,05241	0,05533	0,05824	0,06116	0,06408	0,06700	0,06993	**86°**
4°	0,06993	0,07285	0,07578	0,07870	0,08163	0,08456	0,08749	**85°**
5°	0,08749	0,09042	0,09335	0,09629	0,09923	0,10216	0,10510	**84°**
6°	0,10510	0,10805	0,11099	0,11394	0,11688	0,11983	0,12278	**83°**
7°	0,12278	0,12574	0,12869	0,13165	0,13461	0,13758	0,14054	**82°**
8°	0,14054	0,14351	0,14648	0,14945	0,15243	0,15540	0,15838	**81°**
9°	0,15838	0,16137	0,16435	0,16734	0,17033	0,17333	0,17633	**80°**
10°	0,17633	0,17933	0,18233	0,18534	0,18835	0,19136	0,19438	**79°**
11°	0,19438	0,19740	0,20042	0,20345	0,20648	0,20952	0,21256	**78°**
12°	0,21256	0,21560	0,21864	0,22169	0,22475	0,22781	0,23087	**77°**
13°	0,23087	0,23393	0,23700	0,24008	0,24316	0,24624	0,24933	**76°**
14°	0,24933	0,25242	0,25552	0,25862	0,26172	0,26483	0,26795	**75°**
15°	0,26795	0,27107	0,27419	0,27732	0,28046	0,28360	0,28675	**74°**
16°	0,28675	0,28990	0,29305	0,29621	0,29938	0,30255	0,30573	**73°**
17°	0,30573	0,30891	0,31210	0,31530	0,31850	0,32171	0,32492	**72°**
18°	0,32492	0,32814	0,33136	0,33460	0,33783	0,34108	0,34433	**71°**
19°	0,34433	0,34758	0,35085	0,35412	0,35740	0,36068	0,36397	**70°**
20°	0,36397	0,36727	0,37057	0,37388	0,37720	0,38053	0,38386	**69°**
21°	0,38386	0,38721	0,39055	0,39391	0,39727	0,40065	0,40403	**68°**
22°	0,40403	0,40741	0,41081	0,41421	0,41763	0,42105	0,42447	**67°**
23°	0,42447	0,42791	0,43136	0,43481	0,43828	0,44175	0,44523	**66°**
24°	0,44523	0,44872	0,45222	0,45573	0,45924	0,46277	0,46631	**65°**
25°	0,46631	0,46985	0,47341	0,47698	0,48055	0,48414	0,48773	**64°**
26°	0,48773	0,49134	0,49495	0,49858	0,50222	0,50587	0,50953	**63°**
27°	0,50953	0,51319	0,51688	0,52057	0,52427	0,52798	0,53171	**62°**
28°	0,53171	0,53545	0,53920	0,54296	0,54673	0,55051	0,55431	**61°**
29°	0,55431	0,55812	0,56194	0,56577	0,56962	0,57348	0,57735	**60°**
30°	0,57735	0,58124	0,58513	0,58905	0,59297	0,59691	0,60086	**59°**
31°	0,60086	0,60483	0,60881	0,61280	0,61681	0,62083	0,62487	**58°**
32°	0,62487	0,62892	0,63299	0,63707	0,64117	0,64528	0,64941	**57°**
33°	0,64941	0,65355	0,65771	0,66189	0,66608	0,67028	0,67451	**56°**
34°	0,67451	0,67875	0,68301	0,68728	0,69157	0,69588	0,70021	**55°**
35°	0,70021	0,70455	0,70891	0,71329	0,71769	0,72211	0,72654	**54°**
36°	0,72654	0,73100	0,73547	0,73996	0,74447	0,74900	0,75355	**53°**
37°	0,75355	0,75812	0,76272	0,76733	0,77196	0,77661	0,78129	**52°**
38°	0,78129	0,78598	0,79070	0,79544	0,80020	0,80498	0,80978	**51°**
39°	0,80978	0,81461	0,81946	0,82434	0,82923	0,83415	0,83910	**50°**
40°	0,83910	0,84407	0,84906	0,85408	0,85912	0,86419	0,86929	**49°**
41°	0,86929	0,87441	0,87955	0,88473	0,88992	0,89515	0,90040	**48°**
42°	0,90040	0,90569	0,91099	0,91633	0,92170	0,92709	0,93252	**47°**
43°	0,93252	0,93797	0,94345	0,94896	0,95451	0,96008	0,96569	**46°**
44°	0,96569	0,97133	0,97700	0,98270	0,98843	0,99420	1,00000	**45°**
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	α
	cot α							

Trigonometrijske funkcije: tangens od 45° do 90°, kotangens od 0° do 45°

	tan α							
α	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
45°	1,00000	1,00583	1,01170	1,01761	1,02355	1,02952	1,03553	**44°**
46°	1,03553	1,04158	1,04766	1,05378	1,05994	1,06613	1,07237	**43°**
47°	1,07237	1,07864	1,08496	1,09131	1,09770	1,10414	1,11061	**42°**
48°	1,11061	1,11713	1,12369	1,13029	1,13694	1,14363	1,15037	**41°**
49°	1,15037	1,15715	1,16398	1,17085	1,17777	1,18474	1,19175	**40°**
50°	1,19175	1,19882	1,20593	1,21310	1,22031	1,22758	1,23490	**39°**
51°	1,23490	1,24227	1,24969	1,25717	1,26471	1,27230	1,27994	**38°**
52°	1,27994	1,28764	1,29541	1,30323	1,31110	1,31904	1,32704	**37°**
53°	1,32704	1,33511	1,34323	1,35142	1,35968	1,36800	1,37638	**36°**
54°	1,37638	1,38484	1,39336	1,40195	1,41061	1,41934	1,42815	**35°**
55°	1,42815	1,43703	1,44598	1,45501	1,46411	1,47330	1,48256	**34°**
56°	1,48256	1,49190	1,50133	1,51084	1,52043	1,53010	1,53987	**33°**
57°	1,53987	1,54972	1,55966	1,56969	1,57981	1,59002	1,60033	**32°**
58°	1,60033	1,61074	1,62125	1,63185	1,64256	1,65337	1,66428	**31°**
59°	1,66428	1,67530	1,68643	1,69766	1,70901	1,72047	1,73205	**30°**
60°	1,73205	1,74375	1,75556	1,76749	1,77955	1,79174	1,80405	**29°**
61°	1,80405	1,81649	1,82906	1,84177	1,85462	1,86760	1,88073	**28°**
62°	1,88073	1,89400	1,90741	1,92098	1,93470	1,94858	1,96261	**27°**
63°	1,96261	1,97680	1,99116	2,00569	2,02039	2,03526	2,05030	**26°**
64°	2,05030	2,06553	2,08094	2,09654	2,11233	2,12832	2,14451	**25°**
65°	2,14451	2,16090	2,17749	2,19430	2,21132	2,22857	2,24604	**24°**
66°	2,24604	2,26374	2,28167	2,29984	2,31826	2,33693	2,35585	**23°**
67°	2,35585	2,37504	2,39449	2,41421	2,43422	2,45451	2,47509	**22°**
68°	2,47509	2,49597	2,51715	2,53865	2,56046	2,58261	2,60509	**21°**
69°	2,60509	2,62791	2,65109	2,67462	2,69853	2,72281	2,74748	**20°**
70°	2,74748	2,77254	2,79802	2,82391	2,85023	2,87700	2,90421	**19°**
71°	2,90421	2,93189	2,96004	2,98869	3,01783	3,04749	3,07768	**18°**
72°	3,07768	3,10842	3,13972	3,17159	3,20406	3,23714	3,27085	**17°**
73°	3,27085	3,30521	3,34023	3,37594	3,41236	3,44951	3,48741	**16°**
74°	3,48741	3,52609	3,56557	3,60588	3,64705	3,68909	3,73205	**15°**
75°	3,73205	3,77595	3,82083	3,86671	3,91364	3,96165	4,01078	**14°**
76°	4,01078	4,06107	4,11256	4,16530	4,21933	4,27471	4,33148	**13°**
77°	4,33148	4,38969	4,44942	4,51071	4,57363	4,63825	4,70463	**12°**
78°	4,70463	4,77286	4,84300	4,91516	4,98940	5,06584	5,14455	**11°**
79°	5,14455	5,22566	5,30928	5,39552	5,48451	5,57638	5,67128	**10°**
80°	5,67128	5,76937	5,87080	5,97576	6,08444	6,19703	6,31375	**9°**
81°	6,31375	6,43484	6,56055	6,69116	6,82694	6,96823	7,11537	**8°**
82°	7,11537	7,26873	7,42871	7,59575	7,77035	7,95302	8,14435	**7°**
83°	8,14435	8,34496	8,55555	8,77689	9,00983	9,25530	9,51436	**6°**
84°	9,51436	9,78817	10,0780	10,3854	10,7119	11,0594	11,4301	**5°**
85°	11,4301	11,8262	12,2505	12,7062	13,1969	13,7267	14,3007	**4°**
86°	14,3007	14,9244	15,6048	16,3499	17,1693	18,0750	19,0811	**3°**
87°	19,0811	20,2056	21,4704	22,9038	24,5418	26,4316	28,6363	**2°**
88°	28,6363	31,2416	34,3678	38,1885	42,9641	49,1039	57,2900	**1°**
89°	57,2900	68,7501	85,9398	114,589	171,885	343,774	∞	**0°**
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	α
	cot α							

Izračunavanje stranica i kutova troknta

a) *Pravokutni trokut* ($\gamma = 90°$)

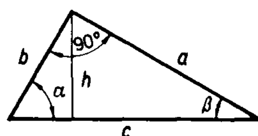
$\alpha + \beta = 90°$

$a/c = \sin\alpha = \cos\beta = h/b$

$b/c = \cos\alpha = \sin\beta = h/a$

$a/b = \tan\alpha = \cot\beta$

$b/a = \cot\alpha = \tan\beta$



Visina nad hipotenuzom $h = ab/c$ Pitagorin poučak $a^2 + b^2 = c^2$

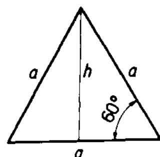
Poznato	Tražimo	
a, b	$c = \sqrt{a^2 + b^2}$ $\tan \alpha = a/b$ $\tan \beta = b/a$	$h = ab/\sqrt{a^2 + b^2}$ $\beta = 90° - \alpha$
a, c	$b = \sqrt{c^2 - a^2}$ $\sin \alpha = a/c$ $\cos \beta = a/c$	$h = (a/c)\sqrt{c^2 - a^2}$ $\beta = 90° - \alpha$
b, c	$a = \sqrt{c^2 - b^2}$ $\cos \alpha = b/c$ $\sin \beta = b/c$	$h = (b/c)\sqrt{c^2 - b^2}$ $\beta = 90° - \alpha$
a, α	$b = a/\tan \alpha = a \cot \alpha$ $c = a/\sin \alpha$	$h = a \cos \alpha$ $\beta = 90° - \alpha$
b, α	$a = b \tan \alpha = b/\cot \alpha$ $c = b/\cos \alpha$	$h = b \sin \alpha$ $\beta = 90° - \alpha$
c, α	$a = c \sin a$ $b = c \cos \alpha$	$h = (c/2) \sin 2\alpha$ $\beta = 90° - \alpha$

b) *Jednakostranični trokut*

$a = (b) = (c)$

$\alpha = (\beta) = (\gamma) = 60°$

$h = \frac{a}{2}\sqrt{3} \approx 0{,}866a$

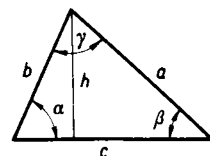


c) *Kosokutni trokut*

$\alpha + \beta + \gamma = 180°$

$\sin \alpha = \sin (\beta + \gamma)$

$\cos \alpha = -\cos (\beta + \gamma)$



Sinusov poučak $a/\sin \alpha = b/\sin \beta = c/\sin \gamma$

Kosinusov poučak
$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$
$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta$
$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$

Projekcijski poučak
$a = b \cos \gamma + c \cos \beta$
$b = a \cos \gamma + c \cos \alpha$
$c = b \cos \alpha + a \cos \beta$

Visina (nad stranicom c) $h = a \sin \beta = b \sin \alpha$

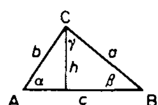
Poznato	Tražimo
$a, b, c,$	$\cos \alpha = (b^2 + c^2 - a^2)/2bc$ $\cos \beta = (a^2 + c^2 - b^2)/2ac$ $\cos \gamma = (a^2 + b^2 - c^2)/2ab$ $\gamma = 180° - (\alpha + \beta)$
a, b, γ	$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma}$ $\tan \alpha = a \sin \gamma/(b - a \cos \gamma)$ $\tan \beta = b \sin \gamma/(a - b \cos \gamma)$ $\beta = 180° - (\alpha + \gamma)$
a, b, α	$c = b \cos \alpha \pm \sqrt{a^2 - b^2 \sin^2 \alpha}$ 1 realno rješenje za: $a = b \sin \alpha$ 2 realna rješenja za: $a > b \sin \alpha$ $\sin \beta = (b/a) \sin \alpha$ $\gamma = 180° - (\alpha + \beta)$
a, β, γ	$b = a \sin \beta/\sin (\beta + \gamma)$ $c = a \sin \gamma/\sin (\beta + \gamma)$ $\alpha = 180° - (\beta + \gamma)$

LIKOVI I TIJELA

Površina i opseg likova

A – površina, O – opseg

1. *Trokuti*



Stranice	a, b, c
Kutovi	α, β, γ
Zbroj kutova	$\alpha + \beta + \gamma = 180°$
Visina na c	$h = a \sin \beta \quad (h \perp c)$
Koordinate vršaka	$A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$,

$A = hc/2$

$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \qquad 2s = a + b + c$

$A = 1/2 \cdot ab \sin \gamma = 1/2 \cdot ac \sin \beta = 1/2 \cdot bc \sin \alpha$

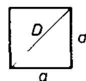
$A = 1/2 \cdot [x_A(y_B - y_C) + x_B(y_C - y_A) + x_C(y_A - y_B)]$

$O = a + b + c = 2s$

2. *Četverokuti*

Stranice $a, b, (c, d)$ — Dijagonala D

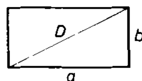
Kutovi $\alpha, \beta, (\gamma, \delta)$ — Visina h



Kvadrat $\quad a(= b) = h, \quad \alpha = 90°$

$A = a^2$

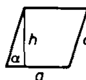
$O = 4a \qquad D = a\sqrt{2}$



Pravokutnik $\quad a \neq b = h, \ \alpha = 90°$

$A = ab$

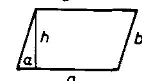
$O = 2(a + b) \qquad D = \sqrt{a^2 + b^2}$



Romb $\quad a(= b) \neq h, \ \alpha \neq 90°$

$A = ah = a^2 \sin \alpha$

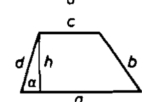
$O = 4a \qquad h = a \sin \alpha$



Paralelogram $\quad a \neq b \neq h, \ \alpha \neq 90°$

$A = ah = ab \sin \alpha$

$O = 2(a + b) \qquad h = b \sin \alpha$



Trapez $\quad a \neq b \neq c \neq d \ (a \parallel c)$

$A = \frac{a + c}{2} h = \frac{a + c}{2} d \sin \alpha$

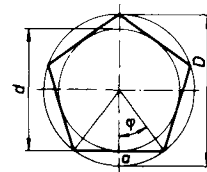
$O = a + b + c + d \qquad h = d \sin \alpha$

3. *Višekuti* (poligoni)

Broj stranica n — Zbroj unutarnjih kutova $180° (n - 2)$

Površinu određujemo rastavljanjem višekuta na trokute. Opseg je zbroj svih stranica.

4. *Pravilni višekuti* sa n stranica



Središnji kut $2\hat{\varphi} = 2\pi/n \qquad \hat{\varphi}$(rad)

$2\varphi = 360°/n$

Površina $\quad A = n(a^2/4) \cot \varphi$

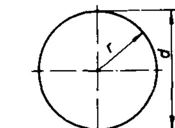
Opseg $\quad O = na$

Promjer opisane kružnice $\quad D = a/\sin \varphi$

Promjer upisane kružnice $\quad d = a/\tan \varphi$

Pravilni likovi	n	$\hat{\varphi}$	φ	A	O	D	d
trokut	3	$\pi/3$	60°	$0{,}433a^2$	$3a$	$1{,}1547a$	$0{,}5774a$
kvadrat	4	$\pi/4$	45°	a^2	$4a$	$1{,}4142a$	a
peterokut	5	$\pi/5$	36°	$1{,}7205a^2$	$5a$	$1{,}7013a$	$1{,}3764a$
šesterokut	6	$\pi/6$	30°	$2{,}5981a^2$	$6a$	$2a$	$1{,}7321a$
osmerokut	8	$\pi/8$	22,5°	$4{,}8284a^2$	$8a$	$2{,}6132a$	$2{,}4142a$

5. *Krug*



Polumjer r, promjer d

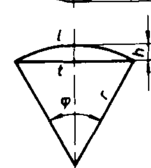
$A = r^2\pi = d^2\pi/4$

$O = 2r\pi = d\pi$ (= duljina kružnice)

Kružni isječak i odsječak

Polumjer r, središnji kut $\varphi \quad \hat{\varphi}$(rad)

Luk $l = r\hat{\varphi} \qquad$ Tetiva $t = 2r \sin \frac{\varphi}{2}$

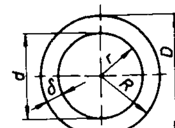


Visina odsječka $\quad h = r\left(1 - \cos\frac{\varphi}{2}\right)$

Površina odsječka $\quad A_o = \frac{r^2}{2}(\hat{\varphi} - \sin \varphi)$

Površina isječka $\quad A_i = \frac{r^2}{2}\hat{\varphi} = \frac{lr}{2}$

Kružni vijenac



Vanjski i unutarnji polumjer R, r

Vanjski i unutarnji promjer D, d

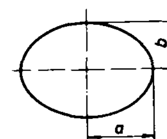
$A = (R^2 - r^2)\pi = (D^2 - d^2)\pi/4$

Uski vijenac širine $\delta = R - r$

Srednji polumjer $\varrho = (R + r)/2$

$A = 2\varrho\pi\delta$

6. *Elipsa*



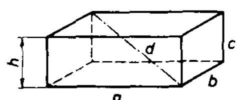
Poluosi a, b

$A = ab\pi$

$O \approx \pi[1{,}5(a + b) - \sqrt{ab}\,]$

Površine i volumeni tijela

V – volumen, obujam, A_o – površina osnovke (baze), A_p – površina plašta, A – oplošje (ukupna površina), h – visina



1. *Prizma*

$V = A_o h$

Pravokutni paralelepiped sa stranicama a, b, c

$V = abc$ $\quad A = 2(ab + ac + bc)$

Dijagonala $\quad d = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$

Kocka s bridom a

$V = a^3$ $\quad A_o = a^2 \quad h = a$

$A = 6a^2$

Dijagonala $\quad d = a\sqrt{3}$

2. *Valjak*

$V = A_o h$

Uspravni valjak s polumjerom r

$V = r^2\pi h \quad A_o = r^2\pi$

$A = 2r\pi(r + h)$

Šuplji valjak s polumjerima R i r

$V = (R^2 - r^2)\pi h \quad A_o = (R^2 - r^2)\pi$

Šuplji valjak s tankom stijenkom

Debeljina stijenke $\delta = R - r$

Srednji polumjer $\quad \varrho = \dfrac{R + r}{2}$

$V = 2\varrho\pi\delta h \quad A_o = 2\varrho\pi\delta$

3. *Piramida*

$$V = \frac{1}{3} A_o h$$

Kvadratna piramida sa stranicom osnovke a i visinom h

$V = a^2h/3$

Kut α između osnovke i pobočke

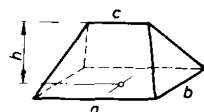
$\tan\alpha = 2h/a$

Prikraćena kvadratna piramida sa stranicama osnovki a i b i visinom h

Visina piramide $h = ha/(a - b)$

$V = h(a^2 + ab + b^2)/3$

4. *Klin*



Stranice osnovke a, b

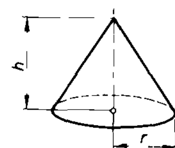
Greben c

$V = (2a + c)bh/6$

$A_p = (a + c)\sqrt{h^2 + b^2/4} + b\sqrt{h^2 + (a - c)^2/4}$

$A = A_p + ab$

5. *Stožac*

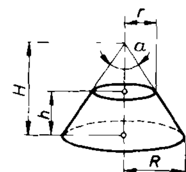


$V = \dfrac{1}{3} r^2\pi h \qquad r$ – polumjer osnovke

$A_p = r\pi s \qquad s = \sqrt{r^2 + h^2}$

$A = r\pi(s + r)$

Prikraćeni stožac



R, r – polumjeri osnovki

h – visina

Visina stošca $\quad H = hR/(R - r)$

Kut stošca $\quad \tan(\alpha/2) = (R - r)/h$

$V = (R^2 + rR + r^2)\pi h/3$

6. *Kugla* $\quad$ Polumjer R, $\quad$ promjer D

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 4{,}1888\,R^3 = \frac{1}{6}\pi D^3 = 0{,}5236\,D^3$$

$A = 4\pi R^2 = \pi D^2$

Kuglin isječak i odsječak

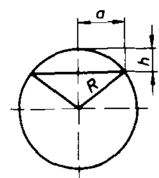
Visina odsječka (kalote) h

polumjer kugline paralele

$a = \sqrt{h(2r - h)}$

volumen odsječka

$V_o = \pi h^2(R - h/3)$



volumen isječka

$$V_i = \frac{2}{3}\pi R^2 h = 2{,}0944\,R^2 h$$

površina plašta odsječka

$A_p = 2\pi Rh$

KOMBINATORIKA

Broj permutacija (poredaka) za n različitih elemenata

$$P(n) = n! = 1.2.3. \ldots .n$$

Broj permutacija za n elemenata, među kojima je m jednakih

$$P(n) = \frac{n!}{m!}$$

Broj kombinacija n elemanata r-tog razreda:

– bez ponavljanja $\quad K_r(n) = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!\,(n-r)!}$

– s ponavljanjem $\quad K_r(n) = \binom{n+r-1}{r} = \frac{(n+r-1)!}{r!\,(n-1)!}$

Broj varijacija n elemenata r-tog razreda:

– bez ponavljanja $\quad V_r(n) = \binom{n}{r} r! = \frac{n!}{(n-r)!}$

– s ponavljanjem $\quad V_r(n) = n^r$

NIZOVI I REDOVI

Niz: $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n, \ldots$

Red: $a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_n + \ldots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$

Aritmetički niz

$$a,\ a+d,\ a+2d,\ a+3d,\ \ldots,\ a+(n-1)\,d,\ \ldots$$

$$d = a_n - a_{n-1} = (a_n - a_1)/(n-1) = \text{konst}$$

Suma n članova aritmetičkog niza

$$s_n = \frac{n}{2}(a_1 + a_n) = \frac{n}{2}[2a_1 + (n-1)d]$$

Neke sume: $s_1 = 1 + 2 + 3 + \ldots + n = \frac{n}{2}(1+n)$

$$s_2 = 1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots + n^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$$

$$s_3 = 1^3 + 2^3 + 3^3 + \ldots + n^3 = \frac{1}{4}n^2(n+1)^2$$

Geometrijski niz

$$a,\ aq,\ aq^2,\ aq^3,\ \ldots,\ aq^{n-1},\ \ldots$$

$$q = a_n/a_{n-1} = \sqrt[n-1]{a_n/a_1} = \text{konst}$$

Suma n članova geometrijskog niza

$$s_n = a_1 \frac{q^n - 1}{q - 1}$$

Važniji redovi

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots + \frac{1}{n} + \ldots \quad \text{nema konačne sume}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \ldots + \frac{1}{n^2} + \ldots = \pi^2/6$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} + \ldots = \pi^2/12$$

Važniji Taylorovi redovi

$$e^{\pm x} = 1 \pm x/1! + x^2/2! \pm x^3/3! + \ldots$$

$$a^x = 1 + \frac{\ln a}{1!}x + \frac{(\ln a)^2}{2!}x^2 + \frac{(\ln a)^3}{3!}x^3 + \ldots \qquad a > 0$$

$$\ln(1 \pm x) = \pm x - x^2/2 \pm x^3/3 - x^4/4 \pm \ldots \qquad -1 < x < +1$$

$$\ln x = 2\left[\frac{x-1}{x+1} + \frac{1}{3}\left(\frac{x-1}{x+1}\right)^3 + \frac{1}{5}\left(\frac{x-1}{x+1}\right)^5 + \ldots\right] \qquad x > 0$$

$$\sin x = x/1! - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + \ldots$$

$$\cos x = 1 - x^2/2! + x^4/4! - x^6/6! + \ldots$$

$$\frac{1}{1 \mp x} = 1 \pm x + x^2 \pm x^3 + \ldots \qquad -1 < x < 1$$

$$(1+x)^n = 1 + \binom{n}{1}x + \binom{n}{2}x^2 + \binom{n}{3}x^3 + \ldots \qquad -1 < x < 1$$

n – realni broj

DETERMINANTE

Determinanta 1. reda

$$|a_{11}| = a_{11}$$

Determinanta 2. reda

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}\, a_{22} - a_{21}\, a_{12}$$

Determinanta 3. reda

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}$$

$$= a_{11}\,(a_{22}\, a_{33} - a_{32}\, a_{23}) - a_{12}\,(a_{21}\, a_{33} - a_{31}\, a_{23}) + $$
$$+ a_{13}\,(a_{21}\, a_{32} - a_{31}\, a_{22})$$

Vrijednost determinante n-tog reda izračunamo tako, da skalarno pomnožimo kojigod redak ili stupac sa subdeterminantama tog retka ili stupca, npr.:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{23} & a_{24} & a_{21} \\ a_{33} & a_{34} & a_{31} \\ a_{43} & a_{44} & a_{41} \end{vmatrix} +$$

$$+ a_{13} \begin{vmatrix} a_{24} & a_{21} & a_{22} \\ a_{34} & a_{31} & a_{32} \\ a_{44} & a_{41} & a_{42} \end{vmatrix} - a_{14} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{vmatrix}$$

Vrijednost determinante se ne mijenja, ako zaokrenemo determinantu oko glavne dijagonale (za 180°):

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Ako su u determinanti dva retka ili dva stupca jednaka ili proporcionalna, vrijednost determinante jednaka je nuli:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \qquad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \qquad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & ka_{12} \\ a_{21} & a_{22} & ka_{22} \\ a_{31} & a_{32} & ka_{32} \end{vmatrix} = 0$$

MATRICE

Matrica A dimenzije m, n ima m redaka i n stupaca

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} = [a_{ik}]_{m,\,n}$$

Ako je $n = 1$, nazivamo matricu – (stupnim) vektorom

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \end{bmatrix}$$

Dvije su matrice jednake, ako imaju jednake dimenzije i odgovarajuće elemente jednake. Matrica 0 ima kojugod dimenziju, a svi su njeni elementi 0.

Zbrajati možemo matrice samo jednakih dimenzija:

$$A = [a_{ik}]_{m,\,n} \qquad B = [b_{ik}]_{m,\,n}$$

$$A + B = [a_{ik} + b_{ik}]_{m,\,n}$$

Matricu $A = [a_{ik}]_{m,\,n}$ množimo sa skalarom k (realnim brojem) tako, da svaki element u matrici pomnožimo s k

$$k\,A = [k\,a_{ik}]_{m,\,n}$$

Umnožak matrica $A\ [a_{ik}]_{m,\,n}$ i $B = [b_{ik}]_{n,\,p}$ je matrica

$$C = A\,B = [c_{ik}]_{m,\,p}$$

gdje je $c_{ik} = a_{i1}\, b_{1k} + a_{i2}\, b_{2k} + \dots + a_{in}\, b_{nk}$.

Iz elemenata matrice $A = [a_{ik}]_{m,\,n}$ možemo križanjem redaka ili stupaca tvoriti determinante svih redova.

K matrici $A = [a_{ik}]_{m,n}$ dobivamo transponiranu matricu $A' = [b_{ik}]_{n,m}$, ako redom zapišemo retke u stupce i stupce u retke ($b_{ik} = a_{ki}$).

Ako je $m = n$, matrica je kvadratna. Svakoj je kvadratnoj matrici pridružena determinanta jednakog sastava. Matrica A je regularna, ako je determinanta različita od 0.

Kvadratna matrica je simetrična, ako je $A' = A$, a nesimetrična, ako je $A' = -A$.

Matrica $A = [a_{ik}]_{m,\,n}$ je r-tog ranga, ako je bar jedna determinanta r-tog reda matrice A različna od 0, a sve višeredne determinante pa su jednake 0.

Rang matrice se ne mijenja, ako:

- međusobno zamijenimo dva stupca (dva retka)
- elemente nekog stupca (retka) pomnožimo brojem k ($k \neq 0$)
- stupac (redak) pomnožimo proizvoljnim brojem te ga pribrojimo k drugom (stupcu) retku.

APSOLUTNA I SREDNJA VRIJEDNOST

Apsolutna vrijednost

Definicija apsolutne vrijednosti $|a|$ realnog broja a glasi

$$|a| = \begin{cases} a \text{ za } a \geqq 0 \\ -a \text{ za } a < 0 \end{cases}$$

Apsolutna vrijednost kompleksnog broja α definirana je jednadžbom

$$|\alpha| = +\sqrt{\alpha\bar{\alpha}} = +\sqrt{a^2 + b^2} \qquad \alpha = a + b\,\mathrm{i} \qquad \bar{\alpha} = a - b\,\mathrm{i}$$

$$|\alpha| = |-\alpha|$$

Za proizvoljne kompleksne brojeve α i β vrijedi

$$|\alpha\beta| = |\alpha||\beta| \qquad \big||\alpha| - |\beta|\big| \leqq |\alpha + \beta| \leqq |\alpha| + |\beta|$$

Poprečne vrijednosti

Za n realnih brojeva $a_1, a_2, \ldots, a_n$ bit će:

- aritmetički prosjek A

$$A = \frac{1}{n}(a_1 + a_2 + \ldots + a_n)$$

- geometrijski prosjek G

$$G = \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot \ldots \cdot a_n} \qquad a_1, \ldots, a_n > 0$$

- harmonički prosjek H

$$H = \frac{1}{n}\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \ldots + \frac{1}{a_n}\right) \qquad a_1, \ldots, a_n \neq 0$$

BINOMI

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$(a \pm b)^n = a^n \pm \binom{n}{1} a^{n-1}b + \ldots + (-1)^k \binom{n}{k} a^{n-k}b^k + \ldots + (-1)^n$$

$$\binom{n}{k} = \frac{n(n-1)(n-2)\ldots(n-k+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot n \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

*

$$a^2 + b^2 = (a + \mathrm{i}b)(a - \mathrm{i}b)$$
$$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$$
$$a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2)$$

ALGEBARSKE JEDNADŽBE

Jednadžba n-tog stupnja

$$a_nx^n + a_{n-1}x^{n-1} + \ldots + a_1x + a_0 = 0 \qquad a_n \neq 0$$

ima u opsegu kompleksnih brojeva n korijena. Korijene takve jednadžbe određujemo, u općem slučaju, poželjnom točnošću metodama numeričke matematike.

Jednadžba prvog stupnja (linearna jednadžba)

$$ax + b = 0 \qquad a \neq 0$$

ima jedno rješenje

$$x = -b/a$$

Jednadžba drugog stupnja (kvadratna jednadžba)

$$ax^2 + bx + c = 0 \qquad a \neq 0$$

ima dva rješenja

$$x_{1,2} = \left(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}\right)/2a$$

Diskriminanta jednadžbe

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

Za $\Delta > 0$ ima jednadžba dva različita realna korijena,
za $\Delta = 0$ ima jednadžba dva jednaka realna korijena,
za $\Delta < 0$ su korijeni jednadžbe konjugirano kompleksni brojevi.

Ako su x_1 i x_2 korijeni jednadžbe $x^2 + px + q = 0$, vrijedi

$$q = x_1x_2 \quad \text{in} \quad p = -(x_1 + x_2)$$

Jednadžba višeg stupnja (trećeg, četvrtog . . .) rješavamo jednostavno samo ako je možemo brzo rastaviti.

Sistem dviju linearnih jednadžbi s dvije nepoznanice (x, y)

$$a_1x + b_1y = c_1 \qquad a_2x + b_2y = c_2$$

Metode rješavanja:

a) Metoda supstitucije
Iz druge jednadžbe $y = (c_2 - a_2x)/b_2$ uvrštavamo u prvu jednadžbu.

b) Metoda komparacije
Iz obiju jednadžbi dobivamo nepoznanicu $y = (c_1 - a_1x)/b_1 = (c_2 - a_2x)/b_2$.

c) Metoda suprotnih koeficijenata
Jednadžbe množimo takvim brojevima, da dobijemo pri članovima s istom nepoznanicom suprotne koeficijente, a potom ih zbrojimo.

$$a_1b_2x + b_1b_2y = b_2c_1 \qquad -a_2b_1x - b_1b_2y = -b_1c_2$$

Rješenje glasi

$$x = \frac{b_2c_1 - b_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1}$$

Na isti način izračunavamo nepoznanicu y.

Sistem linearnih jednadžbi

Sistem n jednadžbi s nepoznanicama $x_1, x_2, \ldots, x_n$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n = b_2$$
$$\vdots$$
$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nn}x_n = b_n$$

Sistem je homogen, ako je $b_1 = b_2 = \ldots = b_n = 0$. Ako je ma i jedan $b_k \neq 0$, sistem nije homogen.

Nehomogen sistem jednoliko je rješiv, ako je determinanta sistema

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & a_{nn} \end{vmatrix} \neq 0$$

Rješenje sistema glasi tada

$$x_1 = \frac{A_1}{A}, \qquad x_2 = \frac{A_2}{A}, \qquad \ldots \qquad x_n = \frac{A_n}{A},$$

gdje su:

$$A_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & \ldots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ b_n & a_{n2} & \ldots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad A_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & b_2 & \ldots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & b_n & \ldots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad A_n = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & b_2 \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & b_n \end{vmatrix}$$

Za nehomogen sistem dviju linearnih jednadžbi s dvije nepoznanice

$$a_1 x + b_1 y = c_1$$
$$a_2 x + b_2 y = c_2,$$

za koje vrijedi $A = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \neq 0,$

glasi rješenje

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{A} = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{A} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

TRANSCENDENTNE JEDNADŽBE

Eksponencijalne jednadžbe

Jednostavna se eksponencijalna jednadžba

$$a^x = b \qquad a > 0,\ a \neq 1$$

rješava logaritmiranjem (naravnim ili dekadnim logaritmima).
Rješenje glasi $x = \ln b / \ln a$

Logaritamske jednadžbe

Jednostavna logaritamska jednadžba

$$\log_a x = b \qquad a > 0,\ a \neq 1$$

ima rješenje

$$x = a^b$$

Trigonometrijske jednadžbe

Za rješavanje jednostavnih trigonometrijskih jednadžbi, npr.

$$\sin(mx + n) = a \qquad m \neq 0,$$

potrebne su tablice vrijednosti trigonometrijskih funkcija ili odgovarajuće računalo. Za jednadžbu $\sin(mx + n) = a$ tražimo iz tablica kut u

$$mx + n = u$$

te dobivamo rješenje

$$x = (u - n)/m$$

*

Nnmeričko rješavanje jednadžbi

U općem slučaju možemo korijene transcedentnih jednadžbi odrediti metodama numeričke matematike.

Realne korijene jednadžbe $f(x) = 0$ pokušavamo izračunati numeričkim metodama tako, da funkciju $y = f(x)$, koja mora biti neprekidna, prikažemo tablicom ili grafički. Korijene dobivamo pri vrijednosti $y = 0$.

NEJEDNADŽBE

Linearna nejednaždba s jednom nepoznanicom

$$ax + b \gtrless 0$$

ima dva rješenja:

$$x \gtrless \frac{-b}{a} \quad \text{za} \quad a > 0 \qquad x \lessgtr \frac{-b}{a} \quad \text{za} \quad a < 0$$

Kvadratnu nejednadžbu s jednom nepoznanicom

$$ax^2 + bx + c \gtrless 0$$

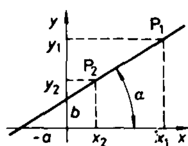
možemo riješiti grafom funkcije

$$y = ax^2 + bx + c$$

tako, da iz slike ustanovimo intervale, gdje je $y \gtrless 0$.

ANALITIČKA GEOMETRIJA
u ravnini

Pravac



Opći oblik jednadžbe

$$Ax + By + C = 0$$

Eksplicitni oblik jednadžbe

$$y = mx + b \qquad \begin{matrix} m = \tan\alpha \\ b - \text{odsječak na osi } y \end{matrix}$$

Segmentni oblik

$$x/a + y/b = 1$$

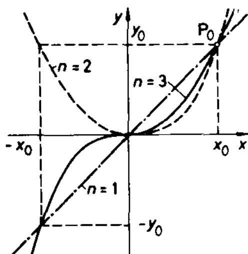
Jednadžba pravca kroz zadanu točku P_1 (x_1, y_1) uz prikloni kut α (priklonski koeficijent m)

$$y - y_1 = m(x - x_1)$$

Jednadžba pravca kroz dvije zadane točke P_1 (x_1, y_1) in P_2 (x_2, y_2)

$$(y - y_1)(x_1 - x_2) = (x - x_1)(y_1 - y_2)$$

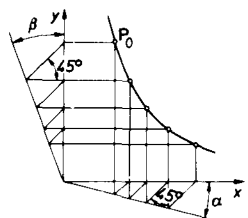
Potencijalne krivulje



Parabole kroz točku P_0 (x_0, y_0)

$$y = y_0 \left(\frac{x}{x_0}\right)^n$$

$n = 1$
$$y = y_0(x/x_0) \qquad \text{(pravac)}$$
$n = 2$
$$y = y_0\,(x/x_0)^2 \qquad \text{(kvadratna parabola)}$$
$n = 3$
$$y = y_0(x/x_0)^3 \qquad \text{(kubna parabola)}$$



Hiperbole kroz točku P_0 (x_0, y_0)

$$yx^m = y_0 x_0^m = \text{konst}$$

Konstrukcija krivulje

$$1 + \tan\beta = (1 + \tan\alpha)^m$$

Npr. za $\tan\alpha = 0{,}25$ je

m	1,1	1,2	1,3	1,4
$\tan\beta$	0,278	0,307	0,336	0,367

Čunjosječnice

Kružnica

Opća jednadžba – za središte u točki (x_0, y_0)

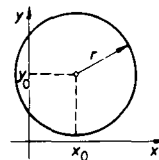
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

Središnja jednadžba – za središte u ishodištu $(x_0 = 0,\ y_0 = 0)$

$$x^2 + y^2 = r^2$$

Tjemenska jednadžba – s ordinantnom osi kao tangentom $(x_0 = r,\ \ y_0 = 0)$

$$y^2 = 2rx - x^2$$



Elipsa $\quad a$, b – poluosi (u smjerovima x, y)

Središnja jednadžba

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$$

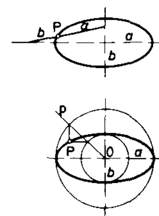
Tjemenska jednadžba

$$y^2 = (b^2/a^2)\,x\,(2a - x)$$

Konstrukcija elipse:

a) Ako dužinu, čiju duljinu $a + b$ točka P dijeli na krakove a i b, pomičemo tako, da njene krajnje točke kližu po međusobno okomitim pravcima, opisuje točka P elipsu.

b) Presjecišta kružnica s polumjerima a i b iz zajedničkog središta 0 s proizvoljnim pravcem p određuje točku P elipse.



Parabola

Tjemenska jednadžba – s ordinatnom osi kao tangentom in s koordinatama žarišta F $(p/2, 0)$

$$y^2 = 2px \qquad 2p - \text{parametar}$$

Za parabolu s osi u smjeru ordinate y su u jednadžbi koordinate x i y zamijenjene.

Jednadžba parabole za tjeme s koordinatama (x_0, y_0)

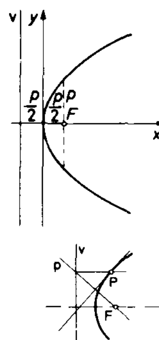
$$(y - y_0)^2 = 2p(x - x_0)$$

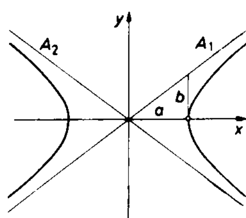
Opći oblik jednadžbe (za os u smjeru ordinate y)

$$y = ax^2 + bx + c$$

Konstrukcija parabole:

Simetrala udaljenosti što je presjeca proizvoljni pravac p kroz žarište F s vodilicom v i paralela s osi parabole kroz presjecište određuju točku P parabole.





Hiperbola (A – asimptote)

Središnja jednadžba

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$$

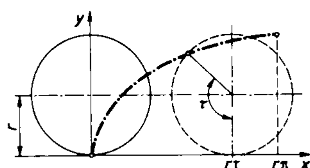
Tjemenska jednadžba

$$y^2 = (b^2/a^2)\ x\ (x - 2a)$$

Kod istostrane hiperbole ($a = b$) su asimptote međusobno okomite i zatvaraju s koordinatnim osima kut 45°

$$x^2 - y^2 = a^2$$

Cikličke krivulje (trohoide)

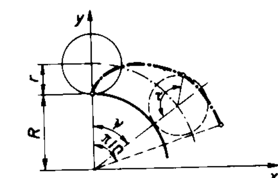


Cikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po pravcu

$$x = r(\hat{\tau} - \sin\tau)$$
$$y = r(1 - \cos\tau)$$

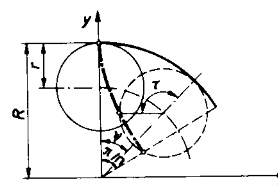
τ – kut kotrljanja

$\hat{\tau}$(rad)



Epicikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po vanjskoj strani druge kružnice

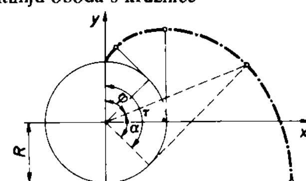
$$x = r(m \sin\psi - \sin m\psi)$$
$$y = r(m \cos\psi - \cos m\psi)$$
$$m = (R + r)/r = n + 1$$
$$n = R/r \qquad \psi = \tau/n$$



Hipocikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po nutranjoj strani druge kružnice

$$x = r(m \sin\psi - \sin m\psi)$$
$$y = r(m \cos\psi + \cos m\psi)$$
$$m = (R - r)/r = n - 1$$
$$n = R/r \qquad \psi = \tau/n$$

Evolventa (involuta) nastaje pri odmatanju oboda s kružnice



$$x = R(\sin\tau - \hat{\tau}\cos\tau)$$
$$y = R(\cos\hat{\tau} + \hat{\tau}\sin\tau)$$
$$r = R/\cos\alpha$$
$$\hat{\tau} = \tan\alpha$$
$$\varphi = \tan\alpha - \hat{\alpha} = \text{inv}\ \alpha$$

$\hat{\tau}$, $\hat{\alpha}$(rad)

Evolventna funkcija inv $\alpha = \tan\alpha - \hat{\alpha}$

α°	0′	10′	20′	30′	40′	50′
15	0,006 150	0,006 361	0,006 577	0,006 798	0,007 025	0,007 256
16	0,007 493	0,007 735	0,007 982	0,008 234	0,008 492	0,008 756
17	0,009 025	0,009 299	0,009 580	0,009 866	0,010 158	0,010 456
18	0,010 760	0,011 071	0,011 387	0,011 709	0,012 038	0,012 373
19	0,012 715	0,013 063	0,013 418	0,013 779	0,014 148	0,014 523
20	0,014 904	0,015 293	0,015 689	0,016 092	0,016 502	0,016 920
21	0,017 345	0,017 777	0,018 217	0,018 665	0,019 120	0,019 583
22	0,020 054	0,020 533	0,021 019	0,021 514	0,022 018	0,022 529
23	0,023 049	0,023 577	0,024 114	0,024 660	0,025 214	0,025 777
24	0,026 350	0,026 931	0,027 521	0,028 121	0,028 729	0,029 348
25	0,029 975	0,030 613	0,031 260	0,031 917	0,032 583	0,033 260
26	0,033 947	0,034 644	0,035 352	0,036 069	0,036 798	0,037 537
27	0,038 287	0,039 047	0,039 819	0,040 602	0,041 395	0,042 201
28	0,043 017	0,043 845	0,044 685	0,045 537	0,046 400	0,047 276
29	0,048 164	0,049 064	0,049 976	0,050 901	0,051 838	0,052 788
30	0,053 751	0,054 728	0,055 717	0,056 720	0,057 736	0,058 765

FUNKCIJE

Ako je svakoj vrijednosti x za $a \leqq x \leqq b$ pridružen točno određen realni broj y, kaže se, da je u intervalu $[a, b]$ dana funkcija f, što se piše

$$y = f(x)$$

x – argument ili neodvisna varijabla
$f(x)$ – funkcijska vrijednost
$[a, b]$ – definicijsko područje funkcije
Graf funkcije f (krivulja $f(x)$) je skup svih točaka $(x, f(x))$ u ravnini x, y.

Elementarne funkcije

Polinom ili cijela racionalna funkcija n-tog stupnja je

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 \qquad a_n \neq 0$$

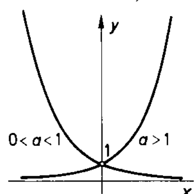
Razlomljena racionalna funkcija je kvocijent dvaju polinoma

$$f(x) = \frac{b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \cdots + b_1 x + b_0}{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0}$$

Eksponencijalna i logaritamska funkcija

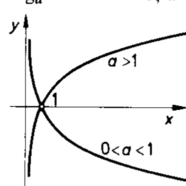
Eksponencijalna funkcija

$y = a^x \quad a > 0, a \neq 1$



Logaritamska funkcija

$y = \log_a x \quad a > 0, a \neq 1$

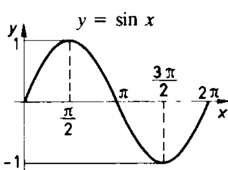


Logaritamske su funkcije inverzne eksponencijalnim funkcijama.

Kutne funkcije

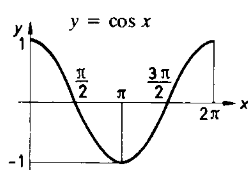
Sinus

$y = \sin x$



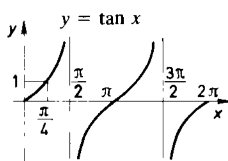
Kosinus

$y = \cos x$



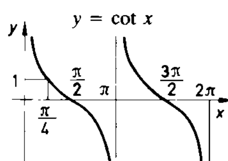
Tangens

$y = \tan x$

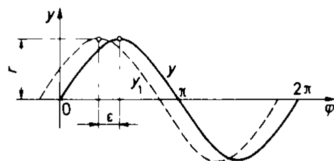


Kotangens

$y = \cot x$



Pomaknuta sinusoida



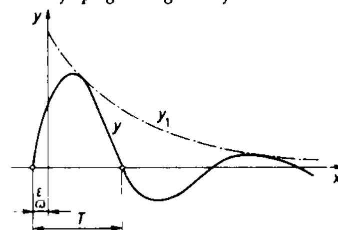
$y = r \sin \varphi$

r – amplituda

Za fazni kut ε pomaknuta sinusoida

$y_1 = r \sin (\varphi + \varepsilon)$

Krivulja prigušenog titranja



$y = ce^{-ax} \sin (\omega x + \varepsilon)$

$y_1 = ce^{-ax}$

$T = 2\pi/\omega$

Logaritamski dekrement

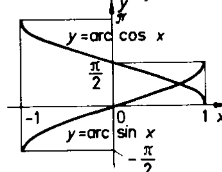
$\Lambda = \ln \frac{y_i}{y_{i+1}} \; a \frac{\pi}{\omega}$

y_i i y_{i+1} su ordinate dvaju susjednih ekstrema.

Ciklometrične funkcije

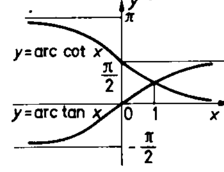
Arkus sinus $y = \text{arc} \sin x$

Arkus kosinus $y = \text{arc} \cos x$



Arkus tangens $y = \text{arc} \tan x$

Arkus kotangens $y = \text{arc} \cot x$



Ciklometričke su funkcije inverzija kutnih funkcija. Među njima postoje slijedeće veze:

$\text{arc} \sin (-x) = -\text{arc} \sin x$
$\text{arc} \cos (-x) = \pi - \text{arc} \cos x$
$\text{arc} \sin x + \text{arc} \cos x = \pi/2$

$\text{arc} \tan (-x) = -\text{arc} \tan x$
$\text{arc} \cot (-x) = \pi - \text{arc} \cot x$
$\text{arc} \tan x + \text{arc} \cot x = \pi/2$

Hiperbolne funkcije

Sinus hiperbolni

$$y = \text{sh}\, x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

Kosinus hiperbolni

$$y = \text{ch}\, x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Tangens hiperbolni

$$y = \text{th}\, x = \frac{\text{sh}\, x}{\text{ch}\, x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Kotangens hiperbolni

$$y = \text{cth}\, x = \frac{\text{ch}\, x}{\text{sh}\, x} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}$$

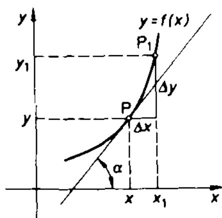
Osnovne veze među hiperbolnim funkcijama:

$\text{ch}^2 x - \text{sh}^2 x = 1$
$1 - \text{th}^2 x = 1/(\text{ch}^2 x)$
$\text{cth}^2 x - 1 = 1/(\text{sh}^2 x)$
$\text{sh}\, 2x = 2\, \text{sh}\, x\, \text{ch}\, x$
$\text{ch}\, 2x = \text{ch}^2 x + \text{sh}^2 x$

$\text{sh}\,(x \pm y) = \text{sh}\, x\, \text{ch}\, y \pm \text{ch}\, x\, \text{sh}\, y$
$\text{ch}\,(x \pm y) = \text{ch}\, x\, \text{ch}\, y \pm \text{sh}\, x\, \text{sh}\, y$

$\text{sh}^2 x = (\text{ch}\, 2x - 1)/2$
$\text{ch}^2 x = (\text{ch}\, 2x + 1)/2$

DERIVACIJA FUNKCIJE



Derivacija funkcije $y = f(x)$ v točki x

$$y' = f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

Osnovna pravila deriviranja

$[u(x) \pm v(x)]' = u'(x) \pm v'(x)$
$[c \cdot u(x)]' = c \cdot u'(x) \qquad c = \text{konst}$
$[u(x) \cdot v(x)]' = u'(x)v(x) + u(x)v'(x)$
$[u(x)/v(x)]' = [u'(x)v(x) - u(x)v'(x)]/[v(x)]^2$
$\{u[v(x)]\}' = u'(v) \cdot v'(x)$

Derivacija elementarnih funkcija

$y = c$	$y' = 0$	
$y = x^n$	$y' = nx^{n-1}$	n – realni broj
$y = \sqrt{x}$	$y' = 1/(2\sqrt{x})$	
$y = a^x$	$y' = a^x \ln a$	
$y = e^x$	$y' = e^x$	
$y = \log_a x$	$y' = 1/(x \ln a)$	
$y = \lg x$	$y' = 1/(2.3026\, x)$	
$y = \ln x$	$y' = 1/x$	
$y = \sin x$	$y' = \cos x$	
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$	
$y = \tan x$	$y' = 1/\cos^2 x = 1 + \tan^2 x$	
$y = \cot x$	$y' = -1/\sin^2 x = -(1 + \cot^2 x)$	
$y = \text{arc} \sin x$	$y' = 1/\sqrt{1 - x^2}$	
$y = \text{arc} \cos x$	$y' = -1/\sqrt{1 - x^2}$	
$y = \text{arc} \tan x$	$y' = 1/(1 + x^2)$	
$y = \text{arc} \cot x$	$y' = -1/(1 + x^2)$	

Diferencijal fnnkcije $y = f(x)$ u točki x je $\qquad dy = f'(x)dx = df$

Osnovna pravila pri računanju diferencijala

$d[u(x) \pm v(x)] = du \pm dv \qquad d[u(x) \cdot v(x)] = u(x)dv + v(x)du$
$d[c \cdot u(x)] = c \cdot du \qquad d[u(x)/v(x)] = [v(x)du - u(x)dv]/[v(x)]^2$

Derivacije višega reda

Ako je $f'(x)$ derivacija funkcije $y = f(x)$, tada je derivacija drugoga reda (druga derivacija)

$$f''(x) = [f'(x)]' = y'' = d^2y/dx^2$$

Derivacija n-tog reda funkcije $f(x)$

$$f^{(n)}(x) = [f^{(n-1)}(x)]' = y^{(n)} = d^ny/dx^n$$

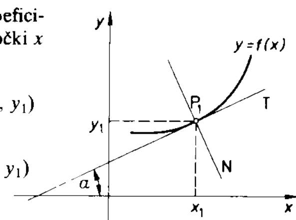
Derivacija parametarski zadane funkcije

Za funkciju $x = x(t)$, $y = y(t)$, gdje je t parametar, bit će $y'(x) = \dot{y}(t)/\dot{x}(t)$ i $y''(x) = [\dot{x}(t)\,\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\,\dot{y}(t)]/[\dot{x}(t)]^3$, pričem je točkom označena derivacija funkcije s obzirom na parametar t.

Geometrijsko značenje derivacije funkcije

Derivacija funkcije $f'(x)$ jednaka je koeficijentu naklona tangente na krivulju $f(x)$ u točki x

$$f'(x) = \tan \alpha$$



Tangenta na krivulju $f(x)$ v točki P_1 (x_1, y_1)

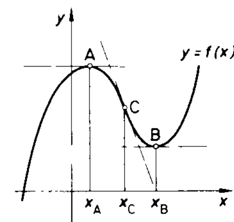
$$y - y_1 = f'(x_1)(x - x_1)$$

Normala na krivulju $f(x)$ v točki P_1 (x_1, y_1)

$$y - y_1 = [-1/f'(x_1)](x - x_1)$$

Ekstremne vrijednosti funkcije $f(x)$ bit će u točki, gdje je $f'(x) = 0$:

maksimum (A): $f'(x_A) = 0 \quad f''(x_A) < 0$
minimum (B): $f'(x_B) = 0 \quad f''(x_B) > 0$



Infleksija funkcije $f(x)$ će biti u točki (C), gdje je $\quad f''(x_C) = 0 \quad$ in $\quad f'''(x_C) \neq 0$

Za krivulju $y = f(x)$ su:
– polumjer kružnice zakrivljenosti
$r = \sqrt{(1 + y'^2)^3}/|y''|$
– koordinate središta kružnice zakrivljenosti

$$p = x - [y'(1 + y'^2)]/y'' \qquad q = y + (1 + y'^2)/y''$$

Parcijalna derivacija

Parcijalnu derivaciju funkcije $z = f(x, y)$ – npr. po varijabli x – računamo tako, da nezavisnu varijablu x deriviramo, dok nezavisnu varijablu y pritom smatramo konstantom.

Parcijalna derivacija po x funkcije $z = f(x, y)$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}$$

Parcijalna derivacija po y funkcije $z = f(x, y)$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}$$

Totalni diferencijal funkcije z

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x}dx + \frac{\partial z}{\partial y}dy$$

Derivacije implicitne funkcije $y(x)$, zadane jednadžbom $\varphi(x, y) = 0$

$$y'(x) = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big/ \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

INTEGRAL

Neodređeni integral

$\int f(x)\,\mathrm{d}x = I(x) + C$, gdje je $I'(x) = f(x)$, $C =$ konst

Osnovna pravila za izračunavanje neodređenog integrala

$\int [u(x) \pm v(x)]\mathrm{d}x = \int u'(x)\mathrm{d}x \pm \int v(x)\mathrm{d}x$
$\int [C \cdot u(x)]\mathrm{d}x = C \int u(x)\mathrm{d}x$

Parcijalna integracija (*integratia per partes*)

$\int u(x)\mathrm{d}v = u(x)\,v(x) - \int v(x)\mathrm{d}u$

Neki osnovni integrali

$\int a\mathrm{d}x = ax + C$
$\int x^n\mathrm{d}x = (x^{n+1})/(n+1) + C \qquad n \neq -1$
$\int (1/x)\mathrm{d}x = \ln x + C$
$\int a^x\mathrm{d}x = a^x/\ln a + C$
$\int e^x\mathrm{d}x = e^x + C$
$\int \ln x\,\mathrm{d}x = x(\ln x - 1) + C \qquad \int (1/\sin^2 x)\mathrm{d}x = -\cot x + C$
$\int \sin x\,\mathrm{d}x = -\cos x + C \qquad \int (1/\cos^2 x)\mathrm{d}x = \tan x + C$
$\int \cos x\,\mathrm{d}x = \sin x + C \qquad \int (1/\sqrt{1-x^2})\mathrm{d}x = \arcsin x + C$
$\int \tan x\,\mathrm{d}x = -\ln\cos x + C \qquad \int [1/(1+x^2)]\,\mathrm{d}x = \arctan x + C$
$\int \cot x\,\mathrm{d}x = \ln\sin x + C \qquad \int (1/\sqrt{x^2-a})\mathrm{d}x = \ln(x + \sqrt{x^2-a}) + C$

Uvođenje nove integracijske varijable

$x = x(t) \qquad \mathrm{d}x = \dot{x}(t)\mathrm{d}t$
$\int f(x)\mathrm{d}x = \int f[x(t)]\,\dot{x}(t)\,\mathrm{d}t$

Primjeri:

1. $\int (a+bx)^n\,\mathrm{d}x = \int t^n(1/b)\mathrm{d}t = (1/b)\,(a+bx)^{n+1}/(n+1) + C \quad n \neq 1$
   $a + bx = t \qquad \mathrm{d}x = (1/b)\,\mathrm{d}t$
2. $\int e^{nx}\mathrm{d}x = (1/n)\,e^{nx} + C \qquad \int \sin nx\,\mathrm{d}x = -(1/n)\cos nx + C$
   $nx = t \qquad \mathrm{d}x = (1/n)\,\mathrm{d}t$
3. $\int 1/(x^2+4)\,\mathrm{d}x = (1/4)\int 1/[(x/2)^2 + 1]\,\mathrm{d}x = (1/2)\arctan(x/2) + C$
   $x/2 = t$

Određeni integral

$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = [I(x)]_a^b = I(b) - I(a)$, kjer je $I(x) = \int f(x)\,\mathrm{d}x$

Upotreba određenog integrala

Proračunanje duljine luka krivulje i površine lika

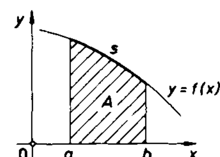
1. Krivulja je zadana jednadžbom $y = f(x)$, $a \leqq x \leqq b$.

Duljina luka s krivulje

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2}\,\mathrm{d}x \qquad \mathrm{d}s = \sqrt{\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2}$$

Površina A lika između luka krivulje i osi x

$$A = \int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x$$



2. Krivulja je zadana parametarski

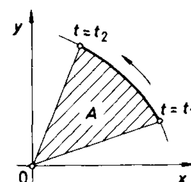
$x = x(t), \quad y = y(t), \quad t_1 \leqq t \leqq t_2$

Duljina luka s krivulje

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}\,\mathrm{d}t$$

Površina A lika

$$A = \frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2} (x\dot{y} - \dot{x}y)\,\mathrm{d}t$$



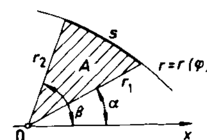
3. Krivulja je zadana polarnim koordinatama $r = r(\varphi)$, $\alpha \leqq \varphi \leqq \beta$.

Duljina luka s krivulje

$$s = \int_\alpha^\beta \sqrt{r^2 + r'^2}\,\mathrm{d}\varphi$$

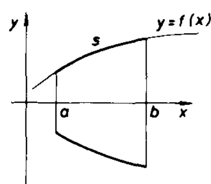
Površina A isječka

$$A = \frac{1}{2}\int_\alpha^\beta r^2(\varphi)\,\mathrm{d}\varphi$$



Izračunavanje površine i volumena rotacijskih tijela

Rotacijsko tijelo nastaje rotacijom krivulje $y = f(x)$ oko osi x, $a \leqq x \leqq b$.



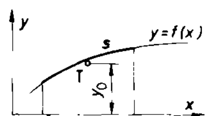
Površina A rotacijskog tijela

$$A = 2\pi \int_a^b y\sqrt{1 + y'^2}\, dx$$

Volumen V rotacijskog tijela

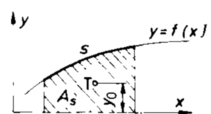
$$V = \pi \int_a^b y^2 dx$$

Guldinova pravila:



Površina A rotacijskog tijela jednaka je umnošku duljine luka s krivulje i opsega kružnice što ga opisuje njeno težište T:

$$A = 2\pi\, y_0 s$$



Volumen V rotacijskog tijela jednak je umnošku površine plohe A_s ispod krivulje i opsega kružnice što je opisuje težište T:

$$V = 2\pi\, y_0\, A_s$$

Težišta linija, likova i tijela – vidi st. 106 do 108.

Numerička integracija

Često treba izračunati vrijednost određenog integrala gdje je funkcija $f(x)$ zadana u obliku tablice ili ne poznajemo njen neodređeni integral.

Trapezna jednadžba

Interval $[a, b]$ podijelimo na n jednakih delova širine $h = (b - a)/n$. Konačne točke k-toga podintegrala su

$$x_{k-1} = x_0 + (k - 1)h \qquad x_k = x_0 + kh$$

pri čemu vrijedi: $x_0 = a$, $x_n = b$, $f(x_k) = y_k$, pa je

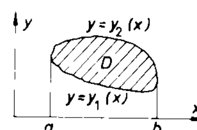
$$\int_a^b f(x)\,dx \approx h\left(\frac{1}{2}y_0 + y_1 + \ldots + y_{n-1} + \frac{1}{2}y_n\right)$$

Višestrnki integrali

Dvostruki integral

Dvostruki integral funkcije $f(x, y)$ na području D izračunavamo jednadžbom

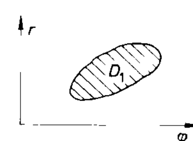
$$\iint_D f(x, y)\,dx\,dy = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y)\,dy$$



Transformacija dvostrukog integrala u polarne koordinate

$$x = r\cos\varphi \qquad y = r\sin\varphi$$

$$\iint_D f(x, y)\,dx\,dy = \iint_{D_1} f(r\cos\varphi, r\sin\varphi)\,r\,dr\,d\varphi$$



Površina područja D_1

$$A = \iint_D dx\,dy$$

Volumen tijela što ga nad područjem D omeđuju plohe, dane jednadžbama:

$$z = z_1(x, y) \quad \text{in} \quad z = z_2(x, y)$$

gdje su:

$$z_2(x, y) \geqq z_1(x, y) \qquad (x, y) \in D$$

$$V = \iint_D [z_2(x, y) - z_1(x, y)]\,dx\,dy$$

Trostruki integral

Trostruki integral funkcije $f(x, y, z)$ na području V izračunavamo jednadžbom

$$\iiint_V f(x, y, z)\,dx\,dy\,dz = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} dy \int_{z_1(x,y)}^{z_2(x,y)} f(x, y, z)\,dz$$

Transformacija trostrukog integrala u polarne (kugline) koordinate:

$$x = r\cos\varphi\cos\vartheta \qquad y = r\cos\varphi\sin\vartheta \qquad z = r\sin\varphi$$

$$\iiint_V f(x, y, z)\,dx\,dy\,dz = \iiint_{V_1} f(r\cos\varphi\cos\vartheta, r\cos\varphi\sin\vartheta, r\sin\varphi)\,r^2\cos\varphi\,dr\,d\varphi\,d\vartheta$$

DIFERENCIJALNE JEDNADŽBE

Diferencijalna jednadžba s rastavljivim varijablama

$$f(x)\mathrm{d}x = g(y)\mathrm{d}y$$

Opće rješenje

$$\int f(x)\mathrm{d}x = \int g(y)\mathrm{d}y + C \qquad C = \text{konst}$$

Homogena diferencijalna jednadžba

$$y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

Rješavamo je supstitucijom

$$y = ux, \qquad y' = u'x + u$$

Opće rješenje

$$\int \frac{1}{x}\,\mathrm{d}x = \int \frac{1}{f(u) - u}\,\mathrm{d}u + C$$

Linearna diferencijalna jednadžba 1. reda

$$y' + g(x)y + h(x) = 0$$

Opće rješenje

$$y = -\mathrm{e}^{-G(x)} \int h(x)\mathrm{e}^{G(x)}\mathrm{d}x + C\mathrm{e}^{-G(x)}$$

gdje je

$$G(x) = \int g(x)\mathrm{d}x$$

Homogena diferencijalna jednadžba 2. reda s konstantnim koeficijentima

$$y'' + a_1y' + a_2y = 0$$

Rješenje pomoću

$$y = \mathrm{e}^{kx}, \qquad y' = k\mathrm{e}^{kx}, \qquad y'' = k^2\mathrm{e}^{kx}$$

otkuda proizlazi karakteristična jednadžba

$$k^2 + a_1k + a_2 = 0$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe ovisno je o korijenima k_1 i k_2 karakteristične jednadžbe:

k_1, k_2 – različiti realni brojevi $\qquad y = C_1\mathrm{e}^{k_1x} + C_2\mathrm{e}^{k_2x}$

k_1, k_2 – jednaki realni brojevi: $k_1 = k_2 = k \qquad y = (C_1 + C_2x)\mathrm{e}^{kx}$

k_1, k_2 – konjugirano kompleksni brojevi: $k_{1,2} = a \pm ib$

$$y = \mathrm{e}^{ax}(C_1 \cos bx + C_2 \sin bx)$$

Nehomogene linearne diferencijalne jednadžbe 2. reda rješavaju se metodom varijacije konstanti.

VEKTORI

Skalari su veličine potpuno određene samo jednim podatkom (npr. vrijeme, masa, radnja, energija, temperatura itd.).

Skalare označujemo simbolima, npr. a.

Vektori su veličine, određene intenzitetom (apsolutnom vrijednošću) i smjerom (npr. sila, moment, brzina, ubrzanje itd.).

Vektore označujemo znakom iznad simbola, npr. $\vec{a}$ ili debljim simbolom, npr. $\boldsymbol{a}$; geometrijski ih prikazujemo orijentiranim dužinama*.

Vektori mogu biti slobodni ili vezani. Slobodni se vektori mogu pomicati u svojem smjeru ili paralelno kamo god u prostoru, a njihovo hvatište može biti svaka točka u prostoru (npr. moment para sila). Vezani se vektori mogu pomicati samo u svojem smjeru, a njihovo hvatište može biti samo neka točka na pravcu u kojem djeluju (npr. sila, kutna brzina). – Više sila koje djeluju u istoj točki su slobodni vektori, ali ako djeluju u različitim točkama, to su vezani vektori.

Apsolutna vrijednost vektora $|\boldsymbol{a}| = a$ je dužina kojom prikazujemo vektor.

Ako je vektor zadan svojim komponentama (koordinatama)

$$\boldsymbol{a} = (a_x, a_y, a_z)$$

vrijedi

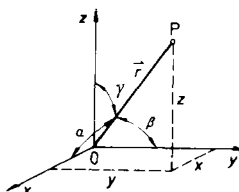
$$|\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Vektori $\boldsymbol{a} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\boldsymbol{b} = (b_x, b_y, b_z)$ su jednaki, ako su im jednake sve komponente

$$a_x = b_x \qquad a_y = b_y \qquad a_z = b_z$$

Radij vektor je vektor, koji vodi od koordinatnoga ishodišta 0 do točke P u prostoru, a označujemo ga sa $\boldsymbol{r}$

$$\boldsymbol{r} = \overrightarrow{OP}$$



Njegove koordinate su i koordinate točke $P(x, y, z)$

$$\boldsymbol{r} = (x, y, z)$$

$$|\boldsymbol{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Ako vektor $\boldsymbol{r}$ zatvara s osima koordinata kutove α, β i γ, bit će smjerni kosinusi vektora $\boldsymbol{r}$

$$\cos\alpha = \frac{x}{r} \quad \cos\beta = \frac{y}{r} \quad \cos\gamma = \frac{z}{r}$$

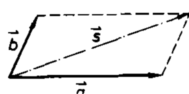
* U ovom su priručniku vektori označeni sa $\vec{a}$ – u slikama, a sa $\boldsymbol{a}$ – u tekstu (iz crtačkih i tiskarskih razloga).

Zbrajanje i oduzimanje vektora

Vektore zbrajamo i oduzimamo po zakonu paralelograma.

Zbroj vektora $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}$

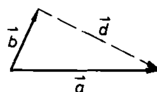
Koordinate zbroja $\boldsymbol{s} = (s_x, s_y, s_z)$ su



$$s_x = a_x + b_x$$
$$s_y = a_y + b_y$$
$$s_z = a_z + b_z$$

Razlika vektora $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{a} - \boldsymbol{b}$

Koordinate razlike $\boldsymbol{d} = (d_x, d_y, d_z)$ su



$$d_x = a_x - b_x$$
$$d_y = a_y - b_y$$
$$d_z = a_z - b_z$$

$$\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b} = \boldsymbol{b} + \boldsymbol{a} \qquad (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) + \boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} + (\boldsymbol{b} + \boldsymbol{c}) \qquad \boldsymbol{a} - \boldsymbol{a} = 0$$

$$\boldsymbol{0} = 0 = (0, 0, 0)$$

Množenje vektora

a) *Množenje vektora skalarom m*, koji je proizvoljan realan broj

$$m\boldsymbol{a} = (ma_x, ma_y, ma_z)$$

Vektor $m\boldsymbol{a}$ leži na istom pravcu kao i vektor $\boldsymbol{a}$, a njegova je apsolutna vrijednost

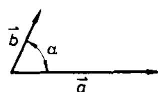
$$|m\boldsymbol{a}| = |m|\,|\boldsymbol{a}|$$

Za $m > 0$ vektori $\boldsymbol{a}$ i $m\boldsymbol{a}$ su istog smisla
za $m < 0$ vektori $\boldsymbol{a}$ i $m\boldsymbol{a}$ su suprotnog smisla

b) *Skalarni produkt dvaju vektora* $\boldsymbol{a}$ *i* $\boldsymbol{b}$ je skalar

$$\boldsymbol{a}\boldsymbol{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = |\boldsymbol{a}|\,|\boldsymbol{b}|\cos\alpha$$

α je kut među vektorima $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$; dobivamo ga iz

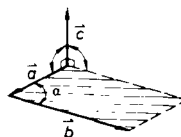


$$\cos\alpha = \boldsymbol{a}\boldsymbol{b}/(|\boldsymbol{a}|\,|\boldsymbol{b}|)$$

$$\boldsymbol{a}\boldsymbol{b} = \boldsymbol{b}\boldsymbol{a} \qquad (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b})\boldsymbol{c} = \boldsymbol{a}\boldsymbol{c} + \boldsymbol{b}\boldsymbol{c}$$
$$\alpha = 0: \qquad \boldsymbol{a}\boldsymbol{b} = |a|\,|b|$$
$$\alpha = \pi/2: \qquad \boldsymbol{a}\boldsymbol{b} = 0$$

c) *Vektorski produkt dvaju vektora* $\boldsymbol{a}$ *i* $\boldsymbol{b}$ je vektor

$$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$$



koji stoji okomito na ravninu vektora $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$. Njegova apsolutna vrijednost jednaka je površini paralelograma, omeđenoga vektorima $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$. Vektor $\boldsymbol{c}$ ima smisao, određen po pravilu desnovojnog vijka.

Koordinate vektorskog produkta $\boldsymbol{c} = (c_x, c_y, c_z)$ su:

$$c_x = a_y b_z - a_z b_y \qquad c_y = a_z b_x - a_x b_z \qquad c_z = a_x b_y - a_y b_x$$

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = -\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{a} \qquad (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) \times \boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} \times \boldsymbol{c} + \boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c}$$

Za $\alpha = 0, \pi$ je $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = 0$

Površina A, koju određuju vektori $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$, je

za trokut $A = 1/2|\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}|$ za paralelogram $A = |\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}|$

č) *Mješoviti produkt vektora* $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ *i* $\boldsymbol{c}$ je skalar

$$(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}) = \boldsymbol{a}(\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c}) = (\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b})\boldsymbol{c}$$

Apsolutna vrijednost mješovitog produkta jednaka je volumenu V paralelopipeda, konstruiranoga nad vektorima $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ i $\boldsymbol{c}$ u prostoru

$$V = |(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})|$$

d) *Rastavljanje vektora* u ravnini i prostoru

Ako vektori $\boldsymbol{a} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\boldsymbol{b} = (b_x, b_y, b_z)$ nisu paralelni ($\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} \neq 0$), tada se svaki treći vektor $\boldsymbol{c} = (c_x, c_y, c_z)$, koji leži u njihovoj ravnini rastavlja u obliku

$$\boldsymbol{c} = m\boldsymbol{a} + n\boldsymbol{b}$$

gdje su m i n skalari, određeni jednadžbama:

$$m = \frac{c_x b_y - c_y b_x}{a_x b_y - a_y b_x} \qquad n = \frac{a_x c_y - a_y c_x}{a_x b_y - a_y b_x}$$

Ako vektori $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ i $\boldsymbol{c}$ nisu u istoj ravnini (miješani produkt $(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}) \neq 0$), tada svaki četvrti vektor $\boldsymbol{d}$ u prostoru rastavljamo u obliku

$$\boldsymbol{d} = m\boldsymbol{a} + n\boldsymbol{b} + p\boldsymbol{c}$$

gdje su skalari m, n i p određeni jednadžbama:

$$m = \frac{(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})}{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})} \qquad n = \frac{(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{c}, \boldsymbol{a})}{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})} \qquad p = \frac{(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})}{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})}$$

Krivulje u prostoru

Duljinu luka s prostorne krivulje $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$ za $\alpha \leqq t \leqq \beta$ proračunavamo jednadžbom

$$s = \int_\alpha^\beta \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}\, dt$$

Ako je krivulja dana jednadžbama $y = y(x)$, $z = z(x)$, bit će duljina luka s za $a \leqq x \leqq b$ jednaka

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2 + z'^2}\, dx$$

Za krivulju danu u vektorskom obliku jednadžbom

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = \big(x(t),\, y(t),\, z(t)\big)$$
$$\dot{\boldsymbol{r}} = \big(\dot{x}(t),\, \dot{y}(t),\, \dot{z}(t)\big)$$

bit će:

infleksijska zakrivljenost

$$\frac{1}{\varrho} = \frac{|\dot{\boldsymbol{r}} \times \ddot{\boldsymbol{r}}|}{|\dot{\boldsymbol{r}}|^3}$$

torzijska zakrivljenost

$$\frac{1}{\tau} = \frac{(\dot{\boldsymbol{r}}, \ddot{\boldsymbol{r}}, \dddot{\boldsymbol{r}})}{|\dot{\boldsymbol{r}} \times \ddot{\boldsymbol{r}}|^2}$$

Skalarna i vektorska polja

Skalarno polje $u = u(x, y, z)$

Vektorsko polje $\boldsymbol{V} = \big(X(x, y, z),\, Y(x, y, z),\, Z(x, y, z)\big)$

Operator derivacije (nabla): $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$

Gradijent skalarnoga polja u je vektorsko polje

$$\text{grad}\, u = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}\right) = \nabla u$$

Divergencija vektorskog polja $\boldsymbol{V}$ je skalarno polje, određeno jednadžbom

$$\text{div}\, \boldsymbol{V} = \nabla\, \boldsymbol{V} = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z}$$

Rotor vektorskog polja $\boldsymbol{V}$ je vektorsko polje, određeno jednadžbom

$$\text{rot}\, \boldsymbol{V} = \nabla \times \boldsymbol{V} = \left(\frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial z}, \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial x}, \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y}\right)$$

Vektorsko je polje $\boldsymbol{V}$ potencijalno, ako je izvedeno kao gradijent skalarnoga polja u

$$\boldsymbol{V} = \text{grad}\, u$$

Vektorsko je polje $\boldsymbol{V}$ solenoidalno (bez izvora), ako je div $\boldsymbol{V} = 0$.

Vektorsko polje $\boldsymbol{V}$ nema vrtloga, ako je rot $\boldsymbol{V} = 0$. Bezvrtložno je vektorsko polje samo tada, ako je potencijalno.

Vektorsko polje $\boldsymbol{V}$ je harmoničko (Laplaceovo), ako u njem nema ni izvora, ni vrtloga. Tada postoji takvo skalarno polje u kod kojega je

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \Delta u = 0$$

gdje je

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad - \quad \text{Laplaceov operator}$$

Derivacija i integracija vektorskih funkcija

Definicije vektorske funkcije $\boldsymbol{a}(t)$ realne varijable t i njene derivacije su iste kao pri skalarnoj funkciji.

Derivacija zbroja i razlike vektora

$$[m\boldsymbol{a}(t) \pm n\boldsymbol{b}(t)]' = m\boldsymbol{a}'(t) \pm n\boldsymbol{b}'(t)$$

Derivacija skalarnog produkta

$$[\boldsymbol{a}(t)\boldsymbol{b}(t)]' = \boldsymbol{a}'(t)\boldsymbol{b}(t) + \boldsymbol{a}(t)\boldsymbol{b}'(t)$$

Derivacija vektorskoga produkta

$$[\boldsymbol{a}(t) \times \boldsymbol{b}(t)]' = \boldsymbol{a}'(t) \times \boldsymbol{b}(t) + \boldsymbol{a}(t) \times \boldsymbol{b}'(t)$$

Vektor $\boldsymbol{a}(t)$ s komponentama X, Y i Z (koje su skalarne funkcije)

$$\boldsymbol{a}(t) = [X(t),\, Y(t),\, Z(t)]$$

ima derivaciju $\quad \boldsymbol{a}'(t) = [X'(t),\, Y'(t),\, Z'(t)]$

Funkcija $\boldsymbol{a}(t, s)$ ima dvije parcijalne derivacije

$$\boldsymbol{a}_t = \left(\frac{\partial X}{\partial t}, \frac{\partial Y}{\partial t}, \frac{\partial Z}{\partial t}\right) \qquad \boldsymbol{a}_s = \left(\frac{\partial X}{\partial s}, \frac{\partial Y}{\partial s}, \frac{\partial Z}{\partial s}\right)$$

i totalni diferencijal

$$d\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_t dt + \boldsymbol{a}_s ds$$

Neodređeni integral vektorske funkcije

$$\boldsymbol{a}(t) = \big(X(t),\, Y(t),\, Z(t)\big)$$

dan je jednadžbom

$$\int \boldsymbol{a}(t)\, dt = \left(\int X(t)\, dt,\, \int Y(t)\, dt,\, \int Z(t)\, dt\right)$$

a određeni integral za $\alpha \leq t \leq \beta$ jednadžbom

$$\int_\alpha^\beta \boldsymbol{a}(t)\, dt = \left(\int_\alpha^\beta X(t)\, dt,\, \int_\alpha^\beta Y(t)\, dt,\, \int_\alpha^\beta Z(t)\, dt\right)$$

LAPLACEOVA TRANSFORMACIJA

Laplaceov transformat $F(x)$ funkcije $f(t)$ (za realni broj t) definiran je jednadžbom

$$F(x) = \mathrm{L}\{f(t)\} = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-tx} f(t)\, dt \qquad x \in \mathbf{C}$$

Svojstva transformacije:

$$\mathrm{L}\{a\, f(t) + b\, g(t)\} = a\, \mathrm{L}\{f(t)\} + b\, \mathrm{L}\{g(t)\}$$

Za $\mathrm{L}\{f(t)\} = F(x)$ je:

$$\mathrm{L}\{f(at)\} = 1/a \cdot F(x/a) \qquad a > 0$$

$$\mathrm{L}\{e^{-at} f(t)\} = F(x + a)$$

$$\mathrm{L}\{f'(t)\} = xF(x) - f(0)$$

$$\mathrm{L}\{f^{(n)}(t)\} = x^n F(x) - x^{n-1} f(0) - x^{n-2} f'(0) - \ldots x f^{(n-2)}(0) - f^{(n-1)}(0)$$

$$\mathrm{L}\{t^n f(t)\} = (-1)^n F^{(n)}(x)$$

Primjeri transformacije:

$f(t)$	$F(x)$	$f(t)$	$F(x)$
1	$1/x$	sh at	$a/(x^2 - a^2)$
t^n	$n!/x^{n+1}$	ch at	$x/(x^2 - a^2)$
e^{at}	$1/(x - a)$	$t\,\mathrm{e}^{at}$	$1/(x - a)^2$
sin at	$a/(x^2 + a^2)$	t sin at	$2ax/(x^2 + a^2)^2$
cos at	$x/(x^2 + a^2)$	t cos at	$(x^2 - a^2)/(x^2 + a^2)^2$

Primjeri inverzne transformacije:

$F(x)$	$f(t)$
1	$\delta(t)$ (impulsna funkcija)
$1/x^n$	$t^{n-1}/(n - 1)!$
$1/(x - a)^n$	$t^{n-1}\mathrm{e}^{at}/(n - 1)!$
$1/(1 + ax)$	$1/a \cdot \mathrm{e}^{-t/a}$
$1/[(x - b)^2 + a^2]$	$1/a \cdot \mathrm{e}^{bt}$ sin at
$(x - b)/[(x - b)^2 + a^2]$	e^{bt} cos at
$1/[(x - b)^2 - a^2]$	$1/a \cdot \mathrm{e}^{bt}$ sh at
$(x - b)/[(x - b)^2 - a^2]$	e^{bt} ch at

STATISTIKA

Matematička se statistika bavi metodama vrednovanja pokusima dobivenih podataka, da bi ustanovila vjerojatne zakonitosti opažanih slučajnih pojava i veličina.

Statistička vjerojatnost

Relativna učestalost p događaja A određena je omjerom

$$p = \frac{m}{n}$$

gdje znače

n — broj ponavljanja pokusa
m — broj koliko se puta događaj A zbio.

Relativna je učestalost uvijek

$$0 \leq p \leq 1$$

pri čemu vrijedi

za $p = 0$ je $m = 0$: događaj nije moguć ni pri jednom opažanju,
za $p = 1$ je $m = n$: događaj se zbiva pri svakom opažanju.

Ako je broj n vrlo velik, uzimamo, da je relativna učestalost p približno jednaka *statističkoj vjerojatnosti* događaja A pri pokusu.

Statistički prosjek

Najznačajnije karakteristike slučajnih veličina su prosječna vrijednosti varijanca.

Prosječna vrijednost $\bar{x}$ je broj, oko kojeg su ṅanizane pokusima dobivene vrijednosti slučajne veličine

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

gdje su

n — broj jednakih pokusa
x_i — vrijednost slučajne veličine pri i-tom pokusu.

Ako su vrijednosti x_i brojčano velike, možemo odabrati približnu prosječnu vrijednost X i računati s razlikama

$$\bar{x} = X + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - X)$$

Zbroj odstupanja vrijednosti slučajne veličine x_i od njene prosječne vrijednosti $\bar{x}$ jednaka je 0

$$\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) = 0$$

Mjera rasapa s^2 (varijanca) je pri *n* pokusa dobivena prosječna vrijednost svote kvadrata odstupanja slučajne veličine x_i od njene prosječne vrijednosti $\bar{x}$

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

Standardna devijacija s je realni korijen mjere rasapa

$$s = +\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

Relativna standardna devijacija (koeficijent varijacije) je

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \qquad \left(= \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%\right)$$

Ako pokusom izmjerimo dvije slučajne veličine x i y, a pri n mjerenjima dobivamo za njih vrijednosti:

$$x_1, x_2, \ldots, x_n \qquad \text{in} \qquad y_1, y_2, \ldots, y_n$$

to će za veličine x i y biti karakterističan broj $s_{x,y}$ (kovarijanca)

$$s_{x,y} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

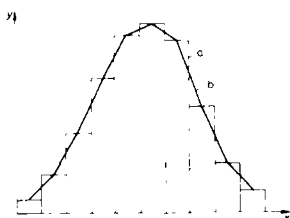
*

Za vrlo veliki osnovni skup vrijedi ukupna devijacija

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - m)^2}$$

gdje su: N – kardinalni broj (brojnost osnovnog skupa), m – srednja vrijednost.

Razdioba učestalosti



Histogram je dijagram, koji pokazuje učestalost vrijednosti slučajne veličine. U njemu se na apscisu nanose mjerene vrijednosti, a na ordinatu učestalost.

Iz grafikona razdiobe učestalosti (a) dobivamo spajanjem sredine vrhova izlomljenu crtu (b) koja se to više približava neprekidnoj krivulji, što je sitnija podjela na apscisi.

Pokusom dobiveni histogram je približenje zakonu razdiobe slučajne veličine.

Normalna razdioba

Pri normalnoj razdiobi teče krivulja učestalosti po Gaussovu zakonu

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$$

gdje su: m – srednja vrijednost, σ – standardna devijacija

Gaussova krivulja proteže se od $-\infty$ do $+\infty$, a simetrična je s obzirom na vrijednost $x = m$, gdje je najveća učestalost

$$x = m \qquad y_{maks} = 1/\sigma\sqrt{2\pi} = 0{,}399/\sigma$$

Od te vrijednosti krivulja vrlo naglo pada simetrično s obje strane i ima infleksiju u točkama $x = m \pm \sigma$, gdje je učestalost

$$x = m \pm \sigma \qquad y = 0{,}607\, y_{maks} = 0{,}242/\sigma$$

Nadalje vrijedi

$$x = m \pm 2\sigma \qquad y = 0{,}135\, y_{maks} = 0{,}054/\sigma$$

$$x = m \pm 3\sigma \qquad y = 0{,}011\, y_{maks} = 0{,}004/\sigma$$

Kod manjih vrijednosti σ krivulja je normalne razdiobe strma, a kod većih σ je položita.

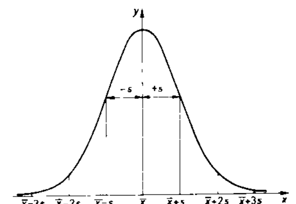
Cjelokupna površina lika među Gaussovom krivuljom i apscisnom osi iznosi

$$A = \int_{x=-\infty}^{+\infty} y\,dx = 1$$

a površine među Gaussovom krivuljom i apscisnom osi u pojedinim intervalima iznose:

u intervalu $m \pm 0{,}67\,\sigma$	$A = 0{,}5$
u intervalu $m \pm \sigma$	$A = 0{,}683$
u intervalu $m \pm 2\,\sigma$	$A = 0{,}955$
u intervalu $m \pm 3\,\sigma$	$A = 0{,}997$

Gaussovu krivulju (koja vrijedi za vrlo veliki broj pokusa N) možemo dovoljnom točnošću upotrebiti i pri manjem broju pokusa n, ako u njoj ukupnu devijaciju σ zamijenimo standardnom devijacijom s, a srednju vrijednost m prosječnom vrijednošću $\bar{x}$.



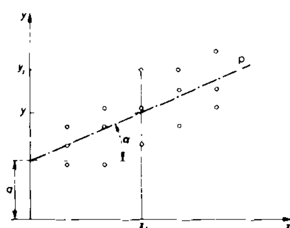
Druge značajnije razdiobe:
binomna, Poissonova, Studentova, razdioba χ^2 itd.

Regresija i korelacija

Krivulja koja spaja pokusom dobivenih n točaka, s apscisama $x_1, x_2, \ldots, x_n$ i ordinatama $y_1, y_2, \ldots, y_n$ nazivamo regresijskom krivuljom odgovarajućih veličina x i y.

Želimo ustanoviti funkcionalnu zavisnost (korelaciju) $y = f(x)$.

Linearna korelacija



Pravac regresije (p)

$$y = a + bx$$

a – odsječak na osi ordinata,
b – koeficijent smjera

$$b = (y - a)/x = \tan \alpha$$

Vrijednosti broja a i b određujemo metodom najmanjih kvadrata, a otuda proizlazi

$$b = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\bar{x}^2\right)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Jednadžbe regresijskog pravca

$$y - \bar{y} = \frac{s_{x,y}}{s_x^2}(x - \bar{x}) \qquad x - \bar{x} = \frac{s_{x,y}}{s_y^2}(y - \bar{y})$$

Greške mjerenja

Pri svakom se mjerenju – bez obzira na okolnosti – pojavljuje *mjerna greška* Δx, a to je razlika između izmjerene vrijednosti x_i i stvarne vrijednosti x

$$\Delta x = x_i - x$$

Iz izmjerene vrijednosti, koju po potrebi valja popraviti (npr. greška mjernog uređaja) ili naknadno preračunati, proizlaziti *mjerni rezultat*.

Sistematske greške pojavljuju se pod jednakim okolnostima i uvijek s jednakom vrijednošću i jednakim predznakom. Možemo ih lako ustanoviti i odgovarajuće računski ispraviti (npr. netočnost = greška mjernog uređaja).

Slučajne greške javljaju se po mjestima i vremenu potpuno nesređeno, s različnim vrijednostima i predznacima (npr. zbog istrošenosti, trenja i sl.). Ne možemo ih predvidjeti, a ne možemo ni popravljati mjerne rezultate. Zbog slučajnih grešaka postaju mjerni rezultati nepouzdani. Ovu manu možemo smanjiti samo većim brojem mjerenja.

U suprotnosti sa sistematskim i slučajnim greškama koje prate svako mjerenje, su *mjerne greške*, a to su mjerna odstupanja koja potiču od zabuna mjerioca, nepravilnog mjernog postupka, oštećenog ili pokvarenog mjernog uređaja itd. Mjerne greške treba bezuvjetno izlučiti pri ocjeni mjernih rezultata.

SUSTAVI MJERNIH JEDINICA

Veličinske jednadžbe i koherentne jedinice

V e l i č i n a je svaki (fizikalni) pojam koji se može mjeriti, npr.: put, brzina, težina, temperatura, električni otpor itd. Po srodnosti fizikalnih pojava s kojima su vezane, dijelimo veličine na geometrijske, vremenske, mehaničke (masa, sila, rad i snaga), električne, magnetske itd.

Fizikalni zakoni određuju međusobnu zavisnost raznovrsnih veličina. Svaki matematički izraz, koji pokazuje samo međusobno zavisnost veličina zovemo v e l i č i n s k o m j e d n a d ž b o m.*

Veličine mjerimo uspoređivanjem s određenom vrijednošću iste veličine, koju smo odabrali za mjeru. Između različitih mjera odabiremo najprikladniju jedinicu.

Jedinice koje odgovaraju veličinskim jednadžbama su d i m e n z i j s k i k o h e r e n t n e j e d i n i c e.

Od dimenzijski koherentnih jedinica možemo samo neke odabrati po volji. Nazivamo ih o s n o v n i m j e d i n i c a m a. Sve ostale jedinice koje određujemo iz osnovnih jedinica s pomoću odgovarajućih veličinskih jednadžbi (»definicijske jednadžbe«) nazivamo i z v e d e n i m j e d i n i c a m a.

Broj osnovnih jedinica veoma je malen. Za sve geometrijske veličine dovoljna je samo jedna osnovna jedinica: za duljinu. Kinematika treba već dvije osnovne jedinice: za duljinu i vrijeme. U kinetici moramo tim dvjema dodati i treću: za masu, a električne i magnetske veličine traže još i četvrtu: za jakost električne struje. Osim tih, potrebne su još osnovne jedinice za temperaturu, svjetlosnu jakost i količinu tvari (materije).

Sve druge jedinice možemo izvesti iz tih osnovnih jedinica.

S u s t a v i j e d i n i c a povezuju osnovne i izvedene jedinice u zajedničku dimenzijsku koherenciju. Novi m e đ u n a r o d n i s u s t a v j e d i n i c a (SI) odlikuje se dimenzijskom koherencijom za sve značajnije veličine u fizici i tehnici.

Brojčane jednadžbe

Ako se pri izboru različitih veličina ne bismo obazirali na jedinice ostalih veličina, mogli bismo fizikalne zakone prikazati samo jednadžbama u kojima bi – kao parazitne koeficijente – trebalo uzimati u obzir i međusobne omjere različitih jedinica.

Takav matematički izraz, prilagođen povoljno odabranim dimenzijski nekoherentnim jedinicama, nije više veličinska jednadžba, već samo b r o j - č a n a j e d n a d ž b a.

Brojčane se jednadžbe upotrebljavaju samo kada se njima želi prikazati međusobni omjer veličina (npr. prema rezultatima mjerenja kod pokusa) kojih međusobna fizikalna ovisnost (još) nije poznata. U svim slučajevima kad su fizikalne ovisnosti poznate, opravdane su samo veličinske jednadžbe.

* U ovome su priručniku sve jednadžbe pisane u veličinskom obliku.

MEĐUNARODNI SUSTAV JEDINICA SI

Godine 1799. u Francuskoj su uredovno ustanovljene jedinice: m e t a r za duljinu i k i l o g r a m za masu.

Godine 1875. u Parizu je 17 država potpisalo *Međunarodnu metarsku konvenciju,* kojoj su postupno pristupale nove države članice, tako da je konvencija nakon sto godina imala 43 članice potpisnice (među njima i Jugoslaviju), dok je metarski sustav upotrebljavalo već više od 120 država.

Za primanje zaključaka Međunarodne metarske konvencije bile su zadužene *Generalne konferencije za utege i mjere.*

Godine 1901. je prof. Giorgi predložio novi »apsolutni sustav jedinica«, koji je bio prvobitno sastavljen za potrebe elektrotehnike te je, osim jedinica metra i kilograma te s e k u n d e kao jedinice za vrijeme, povezivao sve najznačajnije elektrotehničke jedinice. Taj (»Giorgijev«) sustav jedinica je pokazao velike prednosti i na drugim tehničkim područjima, napose u mehanici. Stoga ga je 9. generalna konferencija za utege i mjere u Parizu god. 1948. definitivno primila kao opće prikladan sustav jedinica, koji ima, osim osnovnih jedinica (metra, kilograma i sekunde) još i četvrtu osnovnu jedinicu – a m p e r kao jedinicu za električnu struju, a nazvan je, po tim osnovnim jedinicama »sustav jedinica MKSA«.

10. generalna konferencija god. 1954. dodala je još dvije osnovne jedinice: stupanj Kelvina (godine 1969. preimenovan u k e l v i n) za temperaturu i k a n d e l u za jakost svjetla. 11. generalna konferencija je god. 1960. odredila mnogokratnike jedinica i novome sustavu jedinica dala ima **Međunarodni sustav jedinica SI** (*Système International d'Unités*). Na 13. generalnoj konferenciji god. 1967. ustanovljena je nova definicija za sekundu, a na 14. generalnoj konferenciji god. 1971 dodana je još i sedma osnovna jedinica – m o l kao osnovna jedinica za količinu tvari*

Osnovne jedinice međunarodnoga sustava SI su sada:

za duljinu	– metar	m
za masu	– kilogram	kg
za vrijeme	– sekunda	s
za električnu struju	– amper	A
za temperaturu	– kelvin	K
za jakost svjetla	– kandela	cd
za količinu tvari	– mol	mol

U Jugoslaviji je međunarodni sustav jedinica SI uzakonjen g. 1976. Novi zakon o mjernim jedinicama i mjerama objavljen je u veljači 1984. s važnošću od 17. svibnja 1984.

Osnovne jedinice SI:

Osnovna jedinica za duljinu – m e t a r (m), je bila najprije određena razmakom dviju crtica na međunarodnom prametru od platine i iridija pri temperaturi 0 °C. Prametar je bio određen mjerenjem Zemljina kvadranta, i to kao njegov 10-milijunti dio, ali je kasnijim mjerenjima ustanovljeno neznatno odstupanje od te definicije (kraći je za 0,2 mm).

17. generalna konferencija za mjere i utege u Parizu je g. 1983. odredila novu definiciju metra: to je duljina puta koju u vakuumu prevali svjetlost u 1/299 792 458 sekunde.

Osnovna jedinica za masu – k i l o g r a m (kg) – je određena masom međunarodnog prakilograma od platine i iridija.

Prakilogram je najprije bio određen masom 1 dm^3 destilirane vode pri 4 °C i tlaku 1,01325 bar. Kasnijim je mjerenjima ustanovljeno odstupanje i pri izradi prakilograma, koji stvarno odgovara masi od 1,000028 dm^3 vode pri 4 °C.

Osnovna jedinica za vrijeme – s e k u n d a (s) – prvobitno je bila određena kao 86400. dio srednjeg Sunčeva dana.

13. generalna konferencija za mjere i utege 1967. god u Parizu utvrdila je i novu definiciju sekunde: to je trajanja 9 192 631 770 perioda zračenja cezija ^{133}Cs.

Osnovna jedinica jakosti električne struje – a m p e r (A) – je istosmjerna električna struja koja protječući u vakuumu kroz dva ravna i međusobno 1 m udaljena paralelna vodiča beskonačne duljine i zanemarljivo malena presjeka uzrokoje među vodičima po svakom metru duljine silu od $2 \cdot 10^{-7}$ N.

Osnovna jedinica za temperaturu (termodinamičku) – k e l v i n (K) – je 273,16. dio temperaturnog intervala između apsolutne nule i trojne točke vode.

Osnovna jedinica za jakost svjetla – k a n d e l a (cd) – je jakost svjetla jednovalnoga zračenja frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ Hz i snage 1/683 W/sr. (Hz, W i sr – vidi str. 57)

Jedinica za količinu tvari – m o l (mol) – jest ona količina tvari sustava koja sadrži toliko elementarnih čestica koliko je atoma u 12 g ugljika ^{12}C.

Kad upotrebljavamo mol, moraju elementarne čestice biti posebno označene. To mogu biti: atomi, molekule, ioni, elektroni i druge čestice ili posebno označene skupine takvih čestica.

Broj čestica u molu određuje Avogadrova konstanta

$$N_A = 6{,}022\,045 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$$

Izvedene jedinice SI

Od osnovnih jedinica međunarodnog sustava jedinica SI izvedene su dimenzijski koherentne jedinice geometrijskih i vremenskih veličina:

za površinu	– m^2	za ubrzanje	– m/s^2
za volumen	– m^3	za kutnu brzinu	– 1/s
za brzinu	– m/s	za kutno ubrzanje	– $1/s^2$

Jedinica za silu proizlazi iz Newtonova zakona, da je sila F jednaka umnošku mase m s ubrzanjem $a (F = ma)$, iz kojeg slijedi dimenzijski koherentna jedinica

za silu – kg m/s^2 = N

Ta jedinica sile – nazvana »njutn (N)« – je ona sila koja tijelu mase 1 kg daje ubrzanje 1 m/s^2.

Iz definicije, da je rad W umnožak sile F s putem s $(W = Fs)$ slijedi dimenzijski koherentna jedinica

za rad – N m = J

Ta jedinica energije (rada) – nazvana »džul (J)« – je rad sile 1 N na putu od 1 m.

U međunarodnom sustavu jedinica SI J je istovremeno i koherentna jedinica za toplinu, koja je samo poseban oblik energije.

Definicija za snagu P, koja je rad W obavljen u vremenu t $(P = W/t)$ daje dimenzijski koherentnu jedinicu

za snagu – J/s = W

Jedinica za snagu – nazvana »vat (W)« – je rad 1 J, izvršen u 1 s. Jedinica za energiju (rad) je dakle i J = Ws.

*

Na te glavne dimenzijski hoherentne jedinice međunarodnog sustava jedinica SI nastavljaju se jedinice električnih i magnetskih veličina.

Iz zakona o snazi P istosmjerne električne struje, koja je umnožak napona U i struje I $(P = UI)$, slijedi dimenzijski koherentna jedinica

za napon – W/A = V

Ta jedinica napona – nazvana »volt (V)« – je potencijalna razlika između dviju točaka vodiča u kojem se pri protoku istosmerne struje od 1 A troši među tim točkama snaga od 1 W.

Iz Ohmova zakona, po kojem je napon U jednak umnošku struje I i električnog otpora R $(U = IR)$ slijedi dimenzijski koherentna jedinica

za električni otpor – V/A = Ω

Ta jedinica električnog otpora – nazvana »om (Ω)« – je otpor između dviju točaka vodiča među kojima pri naponu od 1 V teče istosmjerna struja od 1 A.

Slično su definirane i ostale koherentne jedinice međunarodnoga sustava jedinica SI.

Izvedene jedinice međunarodnoga sustava jedinica SI koje nose posebno ime:

za frekvenciju	— herc (hertz)	1 Hz	$= 1\ s^{-1}$
za silu	— njutn (newton)	1 N	$= 1\ kg\ m/s^2$
za energiju	— džul (joule)	1 J	= 1 N m
za snagu	— vat (watt)	1 W	= 1 J/s
za tlak	— paskal (pascal)	1 Pa	$= 1\ N/m^2$
za količinu elektriciteta	— kulon (coulomb)	1 C	= 1 A s
za električni napon	— volt	1 V	= 1 W/A
za električni otpor	— om (ohm)	1 Ω	= 1 V/A
za električnu vodljivost	— simens (siemens)	1 S	$= 1\ \Omega^{-1}$
za električni kapacitet	— farad	1 F	= 1 C/V
za električni induktivitet	— henri (henry)	1 H	= 1 V s/A
za gustoću magnetskog toka	— tesla	1 T	= 1 N/A m
za magnetski tok	— veber (weber)	1 Wb	$= 1\ T\ m^2$
za svjetlosni tok	— lumen	1 lm	= 1 cd sr
za razsvijetljenost	— luks (lux)	1 lx	$= 1\ lm/m^2$
za radioaktivnost	— bekerel (becquerel)	1 Bq	$= 1\ s^{-1}$
za apsorbiranu dozu zračenja	— grej (gray)	1 Gy	= 1 J/kg
za ekvivalentnu dozu zračenja	— sivert (sievert)	1 Sv	= 1 J/kg

Koherentne jedinice međunarodnoga sustava jedinica SI su i jedinice za kutove:

za ravninski kut — radijan 1 rad = puni ravninski kut/2π
za prostorni kut — steradijan 1 sr = puni prostorni kut/4π

Osim navedenih izvedenih koherentnih jedinica koje imaju posebna imena, koherentne jedinice međunarodnog sustava jedinica SI su i sve jedinice izvedene neposredno iz osnovnih jedinica množenjem ili dijeljenjem, npr.

m^2, m^3, m^4, s^{-1}, s^{-2}, K^{-1}
m/s, m/s^2, m^2/s, m^3/s, kg/s, kg/m^3, kg m

ili iz već izvedenih jedinica s posebnim imenom, npr.

N m, N/m^2, N/m^3, N s/m^2, rad/s
J/kg, J/K, J/kgK, W/(m · K), W/m^2K, W/m^2K^4

Pri jedinicama, koje su množenjem izvedene iz osnovnih jedinica ili izvedenih jedinica s posebnim imenom, valja među umnoženim jedinicama ostaviti vidljiv prostor ili točku (znak za množenje), npr.

kg m = kg · m (ne: kgm), N m = N · m (ne: Nm),
W/m K = W/(m · K) (ne: W/mK)

Jednakovrijedni način pisanja

$$1 \frac{W}{m\ K} = 1\ W/m\ K = 1\ W/(m\ K) = 1\ W/(m \cdot K) = 1\ W m^{-1}\ K^{-1}$$

Decimalne mjerne jedinice

S obzirom na to da se mjerena veličina gdjekada mora izraziti neprikladno velikim ili malim brojem jedinica, ustanovljeni su u međunarodnom sustavu jedinica SI i decimalni višekratnici jedinica obilježeni posebnim predmecima:

predmetak	znak	vrijednost	predmetak	znak	vrijednost
deka	da	10^1 *	deci	d	10^{-1} *
hekto	h	10^2 *	centi	c	10^{-2} *
kilo	k	10^3	mili	m	10^{-3}
mega	M	10^6	mikro	μ	10^{-6}
giga	G	10^9	nano	n	10^{-9}
tera	T	10^{12}	piko	p	10^{-12}
peta	P	10^{15}	femo	f	10^{-15}
eksa	E	10^{18}	ato	a	10^{-18}

Ti se decimalni višekratnici dodaju svim osnovnim i izvedenim jedinicama s posebnim imenom, a pišu se ispred tih jedinica i tik uz njih (bez razmaka), npr.

km, mm, μm; dag, mg; ms, μs; mA
kN, MN, mN; kJ, MJ; kW, MW, GW,

Pisanjem predmetaka tik uz mjerne jedinice, decimalne se mjerne jedinice razlikuju od izvedenih jedinica koje su umnožak osnovnih ili izvedenih jedinica s posebnim imenom, pri kojima se mora ostaviti razmak (vidi str. 57). Tako treba razlikovati npr.

ms	= milisekunda	m s = m · s	= metar-sekunda
mN	= milinjutn	m N = m · N	= metar-njutn
W/mK	= vat po milikelvinu	W/m K = W/(m · K)	= vat po metar-kelvinu

Pri svakoj je decimalnoj mjernoj jedinici moguć samo jedan predmetak, npr.

10^{-9}m = 1 nm (ne: = 1 μmm), 10^6g = 1 Mg (ne: = 1 kkg)

Decimalni se višekratnici ne dodaju jedinicama, izraženim potencijom (npr. jedinicama za površinu, volumen, frekvenciju itd.) Dakle:

1 mm² $= (10^{-3}\text{m})^2 = 10^{-6}\text{m}^2$ (ne: $= 1\ \text{m}(\text{m}^2) = 10^{-3}\text{m}^2$)
1 ns⁻¹ → $1\ \text{ns}^{-1} = (10^{-9}\text{s})^{-1} = 10^9\text{s}^{-1}$ (ne: $= 1\ \text{n}(\text{s}^{-1}) = 10^{-9}\text{s}^{-1}$)
$1\ \text{mm}^2/\text{s} = (10^{-3}\text{m})^2/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ (ne: $= 1\ \text{m}(\text{m}^2/\text{s}) = 10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$)

* Upotreba višekratnika da, h, d i c je ograničena; treba ih upotrebljavati samo u slijedećim slučajevima:

dag, dalm, dl, dm, dm², dm³
ha, hl, cl, cm, cm², cm³, cm⁴

JEDINICE I MJERE VELIČINA

(dozvoljene jugoslavenskim zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima)

Geometrijske veličine

1. *Duljina l, put s*

Jedinica SI 1 metar (m)

Druge mjere

nanometar	$1\ \text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10^{-6}\text{mm}$
mikrometar	$1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$
milimetar	$1\ \text{mm} = 10^{-3}\text{m}$
centimetar	$1\ \text{cm} = 10^{-2}\text{m} = 10\ \text{mm}$
decimetar	$1\ \text{dm} = 10^{-1}\text{m} = 10\ \text{cm}$
kilometar	$1\ \text{km} = 10^3\text{m}$
morska milja*	= 1 852 m

2. *Ploha, površina A, S*

Jedinica SI 1 kvadratni metar (m²)

Druge mjere

kvadratni milimetar	$1\ \text{mm}^2 = 10^{-6}\text{m}^2$
kvadratni centimetar	$1\ \text{cm}^2 = 10^{-4}\text{m}^2$
kvadratni decimetar	$1\ \text{dm}^2 = 10^{-2}\text{m}^2$
ar	$1\ \text{a} = 10^2\text{m}^2$
hektar	$1\ \text{ha} = 10^4\text{m}^2 = 100\ \text{a}$
kvadratni kilometar	$1\ \text{km}^2 = 10^6\text{m}^2 = 100\ \text{ha}$

3. *Volumen (obujam, zapremina) V*

Jedinica SI 1 kubni metar (m³)

Druge mjere

kubni milimetar	$1\ \text{mm}^3 = 10^{-9}\text{m}^3$
kubni centimetar	$1\ \text{cm}^3 = 10^{-6}\text{m}^3$
kubni decimetar	$1\ \text{dm}^3 = 10^{-3}\text{m}^3$

Mjere za volumen tekućina (i sipkih tvari)

litar**	$1\ \text{l}\ (1\ \text{L}) = 10^{-3}\text{m}^3 = 1\ \text{dm}^3$
mikrolitar	$1\ \mu\text{l}\ (1\ \mu\text{L}) = 10^{-9}\text{m}^3 = 10^{-6}\text{l}\ (10^{-6}\text{L})$
mililitar	$1\ \text{ml}\ (1\ \text{mL}) = 10^{-6}\text{m}^3 = 10^{-3}\text{l}\ (10^{-3}\text{L})$
centilitar	$1\ \text{cl}\ (1\ \text{cL}) = 10^{-5}\text{m}^3 = 10^{-2}\text{l}\ (10^{-2}\text{L})$
decilitar	$1\ \text{dl}\ (1\ \text{dL}) = 10^{-4}\text{m}^3 = 10^{-1}\text{l}\ (10^{-1}\text{L})$
hektolitar	$1\ \text{hl}\ (1\ \text{hL}) = 10^{-1}\text{m}^3 = 10^2\text{l}\ (10^2\text{L})$

* Smije se upotrebljavati samo za označivanje udaljenosti u pomorskom, riječnom i zračnom saobraćaju. – ** Oznake za litar: l i L su jednakovrijedne.

4. *Ravninski kut* α, $\hat{\alpha}$

Ravninski kut je dio ravnine između dva pravca koji se sjeku u vrhu kuta. Merimo ga duljinom luka među sjecištima pravaca i kružnice sa središtem u vrhu kuta i to omjerima duljine luka i opsega kružnice ili duljine luka i polumjera kružnice (m/m = 1).

Prirodna jedinica za ravninski kut je 1 puni kut*. Puni kut je kut pri kojem je luk jednak opsegu kružnice.

Općenito su u upotrebi mjere za kut α:

kutni stupanj $1° =$ puni kut/360
kutna minuta $1' = 1°/60$
kutna sekunda $1'' = 1'/60 = 1°/3600$

Druge kutne mjere:

gradus ili gon $1^g =$ puni kut/400
pravi kut = puni kut/4

Jedinica SI za lučnu mjeru (= analitički ravninski kut) $\hat{\alpha}$ je 1 radijan (rad). Radijan je kut, pri kojem je luk jednak polumjeru kružnice.

$$1 \text{ rad} = \text{puni kut}/2\pi = 360°/2\pi = 57{,}29578° = 57°17'45''$$

Zbog razlikovanja su u ovom priručniku označeni:

— kutovi, mjereni u stupnjevima, oznakama α, β, γ . . .
— lučne mjere, mjerene u radijanima, oznakama $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$ . . ,

Pretvaranje radijana u kutne stupnjeve

rad	°	rad	°	rad	°	rad	°	rad	°
0,01	0,573	0,32	18,335	0,64	36,670	0,96	55,004	1,28	73,339
0,02	1,146	0,34	19,481	0,66	37,815	0,98	56,150	1,30	74,485
0,04	2,292	0,36	20,626	0,68	38,961	1,00	57,296	1,32	75,630
0,06	3,438	0,38	21,772	0,70	40,107	1,02	58,442	1,34	76,776
0,08	4,584	0,40	22,918	0,72	41,253	1,04	59,588	1,36	77,922
0,10	5,730	0,42	24,064	0,74	42,399	1,06	60,734	1,38	79,068
0,12	6,875	0,44	25,210	0,76	43,545	1,08	61,879	1,40	80,214
0,14	8,021	0,46	26,356	0,78	44,691	1,10	63,025	1,42	81,360
0,16	9,167	0,48	27,502	0,80	45,837	1,12	64,171	1,44	82,506
0,18	10,313	0,50	28,648	0,82	46,983	1,14	65,317	1,46	83,652
0,20	11,459	0,52	29,794	0,84	48,128	1,16	66,463	1,48	84,798
0,22	12,605	0,54	30,940	0,86	49,274	1,18	67,609	1,50	85,944
0,24	13,751	0,56	32,086	0,88	50,420	1,20	68,755	1,52	87,090
0,26	14,897	0,58	33,232	0,90	51,566	1,22	69,901	1,54	88,236
0,28	16,043	0,60	34,377	0,92	52,712	1,24	71,047	1,56	89,381
0,30	17,189	0,62	35,523	0,94	53,858	1,26	72,193	1,57	89,954

* Predložena je (po DIN-u), no međunarodno još nije usvojena, oznaka: pla (lat. *plenus angulus* = puni kut). Jedinica puni kut potpuno odgovara jedinici jedan okretaj (vidi str. 62).

Pretvaranje kutnih stupnjeva, minuta i sekunda u radijane

$1° = 0{,}017453$ rad $\quad 1' = 0{,}000291$ rad $\quad 1'' = 0{,}000005$ rad

°	rad	°	rad	°	rad	°	rad	°	rad
1	0,017 5	19	0,331 6	37	0,645 8	55	0,959 9	73	1,274
2	0,034 9	20	0,349 1	38	0,663 2	56	0,977 4	74	1,291
3	0,052 4	21	0,366 5	39	0,680 7	57	0,994 8	75	1,309
4	0,069 8	22	0,384 0	40	0,698 1	58	1,012	76	1,326
5	0,087 3	23	0,401 4	41	0,715 6	59	1,030	77	1,344
6	0,104 7	24	0,418 9	42	0,733 0	60	1,047	78	1,361
7	0,122 2	25	0,436 3	43	0,750 5	61	1,064	79	1,379
8	0,139 6	26	0,453 8	44	0,767 9	62	1,082	80	1,396
9	0,157 1	27	0,471 2	45	0,785 4	63	1,099	81	1,413
10	0,174 5	28	0,488 7	46	0,802 9	64	1,117	82	1,431
11	0,192 0	29	0,506 1	47	0,820 3	65	1,134	83	1,448
12	0,209 4	30	0,523 6	48	0,837 8	66	1,152	84	1,466
13	0,226 9	31	0,541 0	49	0,855 2	67	1,169	85	1,483
14	0,244 3	32	0,558 5	50	0,872 7	68	1,187	86	1,501
15	0,261 8	33	0,576 0	51	0,890 1	69	1,204	87	1,518
16	0,279 3	34	0,593 4	52	0,907 6	70	1,222	88	1,536
17	0,296 7	35	0,610 9	53	0,925 0	71	1,239	89	1,553
18	0,314 2	36	0,628 3	54	0,942 5	72	1,256	90	1,571

Pretvaranje kutnih minuta i sekunda u decimale kutnih stupnjeva

′	°	′	°	′	°	′	°	′	°
1	0,017	4	0,067	7	0,117	10	0,167	40	0,667
2	0,033	5	0,083	8	0,133	20	0,333	50	0,833
3	0,050	6	0,100	9	0,150	30	0,500	60	1,000

″	°	″	°	″	°	″	°	″	°
1	0,000	4	0,001	7	0,002	10	0,003	40	0,011
2	0,001	5	0,001	8	0,002	20	0,006	50	0,014
3	0,001	6	0,002	9	0,003	30	0,008	60	0,017

Pretvaranje decimala kutnih stupnjeva u kutne minute i sekunde

°	″	°	″	°	′ ″	°	′ ″	°	′	°	′
0,001	4″	0,006	22″	0,01	0′36″	0,06	3′36″	0,1	6′	0,6	36′
0,002	7″	0,007	25″	0,02	1′12″	0,07	4′12″	0,2	12′	0,7	42′
0,003	11″	0,008	29″	0,03	1′48″	0,08	4′48″	0,3	18′	0,8	48′
0,004	14″	0,009	32″	0,04	2′24″	0,09	5′24″	0,4	24′	0,9	54′
0,005	18″	0,010	36″	0,05	3′	0,10	6′	0,5	30′	1,0	60′

5. *Prostorni kut*

Jedinica za prostorni kut je 1 steradijan (sr)

$$1 \text{ sr} = \text{puni prostorni kut}/4\pi$$

Vremenske veličine

1. *Vrijeme t*

Jedinica SI — 1 sekunda (s)

Druge mjere		
milisekunda	1 ms	$= 10^{-3}$ s
kilosekunda	1 ks	$= 10^{3}$ s
minuta	1 min	= 60 s
sat (hora)	1 h	= 60 min = 3600 s
dan (dies)	1 d	= 24 h = 86 400 s
godina (annus)*	1 a	= 8760 h = 31 536 ks

2. *Brzina v, ṡ*

Jedinica SI — 1 metar u sekundi (m/s)

Druge mjere	
metar u minuti	1 m/min = 1/60 m/s
kilometar u sekundi	1 km/s = 10^{3} m/s
kilometar na sat	1 km/h = 1/3,6 m/s
čvor (milja na sat)	1,852 km/h = 0,5144 m/s
brzina svjetlosti	c_0 = 299 792,458 km/s

3. *Ubrzanje, a, v̇, s̈*

Jedinica SI — 1 metar u sekundi na kvadrat (m/s²)

Druga mjera — zemaljsko ubrzanje $g = 9{,}80665$ m/s²

4. *Frekvencija f*

Jedinica SI — 1 herc (hertz) (Hz = s^{-1})

Druge mjere	
kiloherc	1 kHz = 10^{3} Hz
megaherc	1 MHz = 10^{6} Hz
gigaherc	1 GHz = 10^{9} Hz

5. *Kružna frekvencija ω*

Jedinica SI — 1 sekunda na minus prvu (s^{-1})

6. *Brzina vrtnje n*

Jedinica SI — 1 okretaj u sekundi (okr./s)**

Druga mjera — okretaj u minuti 1 okr./min = 1/60 okr./s

7. *Kutna brzina ω*

Jedinica SI — 1 radijan u sekundi (rad/s)

8. *Kutno ubrzanje ε*

Jedinica SI — 1 radijan u sekundi na kvadrat (rad/s²)

* S obzirom na prestupne godine vrijedi u prosjeku: 1 a = 8765,76 h = 31 556,736 ks

** Međunarodno je predložena, ali još nije usvojena, oznaka: rev/s (lat. *revolutio* = okretaj). Jedinica okretaj potpuno odgovara jedinici puni kut (vidi str. 60).

Masene veličine

1. *Masa m*

Jedinica SI — 1 kilogram (kg)

Druge mjere	
miligram	1 mg = 10^{-6} kg = 10^{-3} g
centigram	1 cg = 10^{-5} kg = 10^{-2} g
decigram	1 dg = 10^{-4} kg = 10^{-1} g
gram	1 g = 10^{-3} kg
dekagram	1 dag = 10^{-2} kg = 10 g
megagram	1 Mg = 10^{3} kg = 1 t
tona	1 t = 10^{3} kg = 1 Mg
kilotona	1 kt = 10^{6} kg = 10^{3} t
megatona	1 Mt = 10^{9} kg = 10^{6} t
atomska jedinica mase*	$u = 1{,}660531 \cdot 10^{-27}$ kg

2. *Duljinska masa m_l*

Jedinica SI — 1 kilogram po metar (kg/m)

Druge mjere	
kilogram po kilometru	1 kg/km = 10^{-3} kg/m
teks, tex**	1 teks = 10^{-6} kg/m = 1 g/km

3. *Plošna masa m_A*

Jedinica SI — 1 kilogram po kvadratnom metru (kg/m²)

4. *Volumna masa, gustoća (specifična masa)*

Jedinica SI — 1 kilogram po kubičnom metru (kg/m³)

Druge mjere		
gram po kubnom decimetru	1 g/dm³	= 1 kg/m³
gram po kubnom centimetru	1 g/cm³	= 10^{3} kg/m³
kilogram po kubnom decimetru	1 kg/dm³	= 10^{3} kg/m³
megagram po kubnom metru	1 Mg/m³	= 10^{3} kg/m³
tona po kubnom metru	1 t/m³	= 10^{3} kg/m³

5. *Specifični volumen v*

Jedinica SI — 1 kubni metar po kilogramu (m³/kg)

Druga mjera — kubni decimetar po kilogramu 1 dm³/kg = 10^{-3} m³/kg

6. *Moment tromosti mase J*

Jedinica SI — 1 kilogram-kvadratni metar (kg m²)

Druge mjere		
gram-kvadratni metar	1 g m²	= 10^{-3} kg m²
kilogram-kvadratni milimetar	1 kg mm²	= 10^{-6} kg m²

* Upotreba je dozvoljena samo u kemiji i fizici.

** Upotreba je dozvoljena samo za dužinsku masu tekstilnoga vlakna ili konca.

Protočne veličine

1. *Pretok mase* q_m, q, $\dot{m}$

Jedinica SI	1 kilogram u sekundi (kg/s)		
Druge mjere	gram u sekundi	1 g/s	$= 10^{-3}$ kg/s
	gram u minuti	1 g/min	$= 10^{-3}/60$ kg/s
	gram na sat	1 g/h	$= 10^{-3}/3600$ kg/s
	kilogram u minuti	1 kg/min	= 1/60 kg/s
	kilogram na sat	1 kg/h	= 1/3600 kg/s
	tona u sekundi	1 t/s	$= 10^3$ kg/s
	tona u minuti	1 t/min	$= 10^3/60$ kg/s
	tona na sat	1 t/h	$= 10^3/3600$ kg/s

2. *Volumenski protok* q_v, $\dot{V}$

Jedinica SI	1 kubni metar u sekundi (m^3/s)		
Druge mjere	kubni metar u minuti	1 m^3/min	= 1/60 m^3/s
	kubni metar na sat	1 m^3/h	= 1/3600 m^3/s
	litar u sekundi	1 l/s	$= 10^{-3} m^3/s$
	litar u minuti	1 l/min	$= 10^{-3}/60\ m^3/s$
	litar na sat	1 l/h	$= 10^{-3}/3600\ m^3/s$

Veličine za silu

1. *Sila F*

Jedinica SI	1 njutn, newton (N = kg m/s^2)		
Druge mjere	mikronjutn	1 μN	$= 10^{-6}$ N
	milinjutn	1 mN	$= 10^{-3}$ N
	kilonjutn	1 kN	$= 10^3$ N
	meganjutn	1 MN	$= 10^6$ N

Upozorenje!

Veličine »težina« i »specifična težina« nisu spomenute u jugoslavenskom zakonu o mjernim jedinicama i mjerilima.

Težina G je sila, koja proistječe iz privlačnosti Zemlje za masu m ($G = mg$); mjerimo je dakle kao silu (N). U svakidanjem životu upotrebljavamo »težinu« za vaganjem ustanovljenu masu (g, kg, t).*

»Specifična težina γ« je (zbog prednosti nepromjenljive mase prema promjenljivoj težini) izgubila svoj smisao; stoga je treba u potpunosti zamjeniti gustoćom ϱ ($\gamma = \varrho g$).

* To je u smislu JUS A.A1.025 (1980). Po DIN-u valja razlikovati »težinu-silu« (*Gewichtskraft*), mjerenu u N, od »težine« (*Gewicht*), mjerene u kg.

2. *Moment sile M, okretni moment T,* M_t

Jedinica SI	1 njutn-metar (N m)		
Druge mjere	milinjutn-metar	1 mN m	$= 10^{-3}$ N m
	njutn-milimetar	1 N mm	$= 10^{-3}$ N m
	kilonjutn-metar	1 kN m	$= 10^3$ N m
	meganjutn-metar	1 MN m	$= 10^6$ N m

3. *Tlak p, naprezanje* σ, τ

Jedinica SI	1 paskal, (pascal) (Pa = N/m^2)		
Druge mjere	milipaskal	1 mPa	$= 10^{-3}$ Pa
	kilopaskal	1 kPa	$= 10^3$ Pa
	megapaskal	1 MPa	$= 10^6$ Pa
	kilonjutn na kvadratni metar	1 kN/m^2	= 1 kPa
	meganjutn na kvadratni metar	1 MN/m^2	= 1 MPa
	njutn na kvadratni milimetar	1 N/mm^2	= 1 MPa
	kilonjutn na kvadr. milimetar	1 kN/mm^2	= 1 GPa
	bar	1 bar	$= 10^5$ Pa
	milibar	1 mbar	$= 10^2$ Pa
	mikrobar	1 μbar	$= 10^{-1}$ Pa
	standardni atmosferski tlak	p_a	= 1013,25 mbar

»Relativni tlak p_e« je ralika apsolutnoga tlaka p i (nekog drugog ali redovno) atmosferskog tlaka p_a: $p_e = p - p_a$

$p > p_a$	$p_e > 0$	pretlak
$p < p_a$	$p_e < 0$	podtlak

4. *Impuls sile Ft, količina gibanja mv*

Jedinica SI	1 njutn-sekunda (N s) = = 1 kilogram-metar u sekundi (kg m/s)		
Druge mjere	milinjutn-sekunda	1 mN s	$= 10^{-3}$ N s = 1 g m/s
	kilonjutn-sekunda	1 kN s	$= 10^3$ N s = 1 Mg m/s

5. *Dinamička viskoznost* η

Jedinica SI	1 paskal-sekunda (Pa · s = N s/m^2)	
Druga mjera	milipaskal-sekunda	1 mPa · s $= 10^{-3}$ Pa · s

6. *Kinematička viskoznost* ν

Jedinica SI	1 kvadratni metar u sekundi (m^2/s)	
Druga mjera	kvadratni milimeter u sekundi	1 $mm^2/s = 10^{-6}\ m^2/s$

Energetske veličine

1. *Energija E, rad W, toplina Q*

Jedinica SI	1 džul (Joule) (J = N m)		
Druge mjere	kilodžul	1 kJ	= 10^3 J
	megadžul	1 MJ	= $1u^6$ J
	gigadžul	1 GJ	= $1u^9$ J
	vat-sekunda	1 W s	= 1 J
	vat-sat	1 W h	= 3600 J
	kilovat-sekunda	1 kW s	= 1 kJ
	kilovat-sat	1 kW h	= 3600 kJ
	megavat-sa:	1 MW h	= 3600 MJ
	elektron-volt	1 eV	= 0,160 219 aJ

2. *Snaga P, toplinski tok Φ, $\dot{Q}$*

Jedinica SI	1 vat (watt) (W = J/s)		
Druge mjere	milivat	1 mW	= 10^{-3} W
	kilovat	1 kW	= 10^3 W
	megavat	1 MW	= 10^6 W
	gigavat	1 GW	= 10^9 W
	kilodžul u sekundi	1 kJ/s	= 1 kW
	kilodžul na sat	1 kJ/h	= 1/3600 kW

Toplinske veličine

1. *Temperatura*

Jedinica SI za (termodinamičku) temperaturu je 1 kelvin (K).

Jedinica kelvin je 273,16. dio temperaturne razlike između apsolutne nule i trojne točke vode

Druga mjera za temperaturu je stupanj Celzija (°C).

Stupanj Celzija je 100. dio temperaturne razlike (pri tlaku od 1, 01325 bar) između ledišta i vrelišta vode.

Jedinica kelvin i stupanj Celzija su jednaki: 1 K = 1 °C

a) Temperaturna skala

Apsolutna se temperatura T mjeri od apsolutne nule (0,00 K).

Celzijeva se temperatura t mjeri od ledišta vode (0,00 °C).

$$T(\text{K}) - t(°\text{C}) = 273{,}15$$

Dakle vrijedi:

	T	t
apsolutna nula	0,00 K	−273,15 °C
ledište vode	273,15 K	0,00 °C
trojna točka vode	273,16 K	0,01 °C
vrelište vode	373,15 K	100,00 °C

b) Među istim je temperaturama temperaturna razlika ΔT, mjerena u kelvinima (K), jednaka temperaturnoj razlici Δt, mjerenoj u stupnjevima Celzija (°C):

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta t(°\text{C})$$

2. *Temperaturno raztezanje α, β*

Jedinica SI 1 metar po metru i kelvinu m/(m · K) = K^{-1})

Druga mjera mikrometar po metru i kelvinu 1µm/(m · K) = 10^{-6} K^{-1}

3. *Brzina zagrijavanja i ohlađivanja T/t* (dT/dt)

Jedinica SI	1 kelvin u sekundi (K/s)		
Druge mjere	kelvin u minuti	1 K/min	= 1/60 k/s
	kelvin na sat	1 K/h	= 1/3600 k/s

4. *Specifični toplinski kapacitet c*

Jedinica SI 1 džul po kilogramu i kelvinu (J/kg K)

Druga mjera kilodžul po kilogramu i kelvinu 1 kJ/kg K = 10^3 J/kg K

5. *Entalpija H*

Jedinica SI	1 džul (J)		
Druga mjera	kilodžul	1 kJ	= 10^3 J

6. *Specifična entalpija h*

Jedinica SI	1 džul po kilogramu (J/kg)		
Druga mjera	kilodžul po kilogramu	1 kJ/kg	= 10^3 J/kg

7. *Entropija S*

Jedinica SI	1 džul po kelvinu (J/K)		
Druga mjera	kilodžul po kelvinu	1 kJ/K	= 10^3 J/K

8. *Specifična entropija s*

Jednota SI 1 džul po kelvinu i kilogramu (J/K kg)

Druga mjera kilodžul po kelvinu *i* kilogramu 1 kJ/K kg = 10^3 J/K kg

9. *Ogrjevna moć gornja H_s, i donja H_i*

Jedinica SI	1 džul po kilogramu (J/kg)		
Druge mjere	kilodžul na kilogram	1 kJ/kg	= 10^3 J/kg
	megadžul po kilogramu	1 MJ/kg	= 10^6 J/kg

10. *Toplinska vodljivost λ*

Jedinica SI 1 vat po metru i kelvinu (W/(m · K)

Druga mjera kilovat po metru i kelvinu 1 kW/(m · K) = 10^3 W/(m · K)

11. *Toplinski prijelaz α, toplinski prolaz k*

Jedinica SI 1 vat po kvadratnom metru i kelvinu (W/m² K)

Druga mjera kilovat po kvadratnom metru i kelvinu 1 kW/m²K = 10^3 W/m² K

Molne veličine

1. *Molna masa* m_m

Jedinica SI	1 kilogram po molu (kg/mol)		
Druge mjere	gram po molu	1 g/mol	$= 10^{-3}$ kg/mol
	kilogram po kilomolu	1 kg/kmol	$= 10^{-3}$ kg/mol

2. *Molni volumen* V_m

Jedinica SI	1 kubni metar po molu (m^3/mol)		
Druga mjera	kubni metar po kilomolu	1 m^3/kmol	$= 10^{-3}$/mol

3. *Koncentracija tvari (molarnost)* $1/V_m$

Jedinica SI	1 mol po kubnom metru (mol/m^3)		
Druga mjera	kilomol po kubnom metru	1 kmol/m^3	$= 10^3$ mol/m^3

4. *Molni toplinski kapacitet* c_m

Jedinica SI	1 džul po molu i kelvinu (J/mol K)		
Druge mjere	džul po kilomolu i kelvinu	1 J/kmolK	$= 10^{-3}$J/molK
	kiloždul po kilomolu i kelvinu	1 kJ/kmolK	= 1 J/mol K
	kilodžul po molu i kelvinu	1 kJ/mol K	$= 10^3$ J/mol K

5. *Molna entalpija* h_m

Jedinica SI	1 džul po molu (J/mol)		
Druge mjere	džul po kilomolu	1 J/kmol	$= 10^{-3}$ J/mol
	kilodžul po kilomolu	1 kJ/kmol	= 1 J/mol
	kilodžul po molu	1 kJ/mol	$= 10^3$ J/mol

6. *Molna entropija* s_m

Jedinica SI	1 džul po kelvinu i molu (J/K mol)		
Druge mjere	džul po kilomolu i kelvinu	1 J/K mol	$= 10^{-3}$J/Kmol
	kilodžul po kilomolu i kelvinu	1 kJ/K kmol	= 1 J/K mol
	kilodžul po molu i kelvinu	1 kJ/K mol	$= 10^3$ J/K mol

Veličine zračenja

1. *Aktivnost radioaktivnoga izvora* $A = \mathrm{d}N/\mathrm{d}t$ (broj jezgri N raspalih u vremenu t)
   Jedinica SI 1 bekerel, becquerel (Bq = s^{-1})
2. *Apsorbirana doza ionizirajućega zračenja* $D = E/m$ (energija zračenja E, dovedena tijelu mase m)
   Jedinica SI 1 grej, gray (Gy = J/kg)
3. *Ekvivalentna doza ionizirajućega zračenja* BD = (biološki učin raznih vrsta zračenja s obzirom na rendgensko zračenje: $B = 1$; npr. za zračenje α je $B = 10$
   Jedinica SI 1 sivert, sievert (Sv = J/kg)
4. *Ekspozicijska doza ionizirajućega zračenja* Q/m (ionizacijom izazvan naboj Q u zraku mase m)
   Jedinica SI 1 kulon po kilogramu (C/kg)

Električne veličine

1. *Električna struja* I

Jedinica SI	1 amper (ampère) (A)		
Druge mjere	nanoamper	1 nA	$= 10^{-9}$ A
	mikroamper	1 μA	$= 10^{-6}$ A
	miliamper	1 mA	$= 10^{-3}$ A
	kiloamper	1 kA	$= 10^3$ A

2. *Količina elektriciteta (električni naboj)* Q

Jedinica SI	1 kulon (coulomb) (C = A s)		
Druge mjere	milikulon	1 mC	$= 10^{-3}$ C
	kilokulon	1 kC	$= 10^3$ C
	amper-sekunda	1 A s	= 1 C
	amper-sat	1 A h	= 3600 C

3. *Električni napon* U

Jedinica SI	1 volt (V = W/A)		
Druge mjere	mikrovolt	1 μV	$= 10^{-6}$ V
	milivolt	1 mV	$= 10^{-3}$ V
	kilovolt	1 kV	$= 10^3$ V
	megavolt	1 MV	$= 10^6$ V

4. *Električna jakost polja* E

Jedinica SI	1 volt po metru (V/m = N/C)		
Druge mjere	milivolt po metru	1 mV/m	$= 10^{-3}$ V/m
	kilovolt po metru	1 kV/m	$= 10^3$ V/m
	volt po milimetru	1 V/mm	$= 10^3$ V/m

5. *Električni otpor* R

Jedinica SI	1 om (ohm) (Ω = V/A)		
Druge mjere	miliom	1 mΩ	$= 10^{-3}$ Ω
	kiloom	1 kΩ	$= 10^3$ Ω

6. *Specifični (električni) otpor* ϱ

Jedinica SI	1 om-metar (Ω m)	
Druga mjera	om-kvadratni milimetar na metar	1 Ω mm^2/m $= 10^{-6}$ Ω m

7. *Električna vodljivost* G
   Jedinica SI 1 simens (siemens) (S = 1/Ω)

8. *Kapacitet C*

Jedinica SI	1 farad (F = C/V)		
Druge mjere	pikofarad	1 pF	$= 10^{-12}$ F
	nanofarad	1 nF	$= 10^{-9}$ F
	mikrofarad	1 μF	$= 10^{-6}$ F
	milifarad	1 mF	$= 10^{-3}$ F

9. *Induktivitet L*

Jedinica SI	1 henri (henry) (H = Vs/A)		
Druge mjere	pikohenri	1 pH	$= 10^{-12}$ H
	nanohenri	1 nH	$= 10^{-9}$ H
	mikrohenri	1 μH	$= 10^{-6}$ H
	milihenri	1 mH	$= 10^{-3}$ H

10. *Gustoća magnetskoga toka (magnetska indukcija) B*

Jedinica SI	1 tesla (T = N/A m = Wb/m²)		
Druge mjere	nanotesla	1 nT	$= 10^{-9}$ T
	mikrotesla	1 μT	$= 10^{-6}$ T
	militesla	1 mT	$= 10^{-3}$ T

11. *Magnetski tok Φ*

Jedinica SI	1 veber (weber) (Wb = T m²)		
Druga mjera	miliveber	1 mWb	$= 10^{-3}$ Wb

12. *Magnetska jakost polja H*

Jedinica SI	1 amper po metru (A/m)		
Druge mjere	miliamper po metru	1 mA/m	$= 10^{-3}$ A/m
	kiloamper po metru	1 kA/m	$= 10^{3}$ A/m
	amper po milimetru	1 A/mm	$= 10^{3}$ A/m

Svjetlosne veličine

1. *Jakost energetskoga zračenja*
   Jedinica SI 1 vat na steradian (W/sr)
2. *Jakost svjetla I*
   Jedinica SI 1 kandela (candela) (cd)
3. *Luminancija B*
   Jedinica SI 1 kandela na kvadratni metar (cd/m²)
4. *Svjetlosni tok*
   Jedinica SI 1 lumen (lm = cd · sr)
5. *Rasvijetljenost E*
   Jedinica SI 1 luks (lux) (lx = lm/m²)

STARE JEDINICE I MJERE (uključivši i anglosaske mjere)

Zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima (1984) ove su jedinice zabranjene za javnu upotrebu u Jugoslaviji. Za uža stručna područja dopuštene su iznimke (koje proizlaze iz međunarodnih ugovora Jugoslavije).

1. *Za duljinu*

ongstrem, (ångström)	1 Å	= 0,1 nm	$= 10^{-10}$ m
mikron	1 μ	= 1 μm	$= 10^{-6}$ m
palac, col, inch	1 in. (″)	= 25,4 mm	= 0,0254 m
stopa, foot	1 ft. (′)	= 12″	= 0,3048 m
jard (yard)	1 yd.	= 3′	= 0,9144 m
fadom, fathom	1 fm.	= 2 yds.	= 1,8288 m

2. *Za površinu*

barn	1 b	= 100 fm²	$= 10^{-28}$ m²
square inch	1 sq. in.	= 6,4516 cm²	$= 645,16 \cdot 10^{-6}$ m²
square foot	1 sq. ft.	= 9,2903 dm²	$= 92,903 \cdot 10^{-3}$ m²
square yard	1 sq. yd.		= 0,83613 m²

3. *Za volumen*

cubic inch	1 cu. in.	= 16,387 cm³	$= 16,387 \cdot 10^{-6}$ m³
cubic foot	1 cu. ft.	= 28,32 dm³	$= 28,32 \cdot 10^{-3}$ m³
cubic yard	1 cu. yd.		= 0,76455 m³
registarska tona	1 R.T.	= 100 cu. ft.	= 2,832 m³

4. *Za brzinu*

foot per minute	1 ft./min.		= 0,00508 m/s
foot per second	1 ft./sec.		= 0,3048 m/s
yard per second	1 yd./sec.		= 0,9144 m/s

5. *Za ubrzanje*

gal	1 Gal	= 1 cm/s²	= 0,01 m/s²
foot per sec. per sec.	1 ft./sec. sec.		= 0,3048 m/s²
yard per sec. per sec.	1 yd./sec. sec.		= 0,9144 m/s²

6. *Za masu*

kvintal, metrička centa	1 q		= 100 kg
hyl	1 hyl		= 9,80665 kg
funta, pound (libre)	1 lb.		= 0,45359 kg
long-tona, long ton	1 L/T	= 2240 lb.	= 1016,05 kg
karat (metrički)	1 k		= 0,2 g

7. *Za gustoću*

pound per cubic inch	1 lb./cu. in		= 27680 kg/m³
pound per cubic foot	1 lb./cu. ft.		= 16,017 kg/m³
pound per cubic yard	1 lb./cu. yd.		= 0,59328 kg/m³

8. *Za silu*

milipond	1 mp	$= 10^{-3}$ p	$= 9{,}80665 \cdot 10^{-6}$ N
pond	1 p	$= 10^{-3}$ kp	$= 9{,}80665 \cdot 10^{-3}$ N
kilopond	1 kp		= 9,80665 N
megapond	1 Mp	$= 10^3$ kp	$= 9{,}80665 \cdot 10^3$ N
din	1 dyn	= 10 μN	$= 10^{-5}$ N
sthène	1 st		$= 10^3$ N
poundal	1 pd.		= 0,138254 N

9. *Za tlak i naprezanje*

fizikalna atmosfera	1 atm	= 760 mm Hg	= 101325 Pa
tehnička atmosfera	1 at	$= 1$ kp/cm^2	= 98066,5 Pa
stupac žive (0 °C)	1 mm Hg		= 133,323 Pa
stupac vode (4 °C)	1 mm H_2O	$= 1$ kp/m^2	= 9,80665 Pa
kilopond			
— po kvadratnom metru	1 kp/m^2	= 1 mm H_2O	= 9,80665 Pa
— po kvadratnom centimetru	1 kp/cm^2	= 1 at	= 98066,5 Pa
— po kvadratnom milimetru	1 kp/mm^2		= 9806650 Pa
barye	1 barye	= 0,1 N/m^2	$= 10^{-1}$ Pa
pièze	1 pz	= 1 kN/m^2	$= 10^3$ Pa
hectopièze	1 hpz	= 1 bar	$= 10^5$ Pa
inch of mercury	1 in. Hg		= 3386 Pa
inch of water	1 in. H_2O		= 249,1 Pa
pound per square inch	1 p. s. i.		= 6895 Pa
pound per square foot	1 p. s. f.		= 47,88 Pa
pound per square yard	1 p. s. y.		= 5,320 Pa
long ton per square inch	1 L/T s. i.		= 15444151 Pa
long ton per square foot	1 L/T s. f.		= 107251 Pa

10. *Za dinamičku viskoznost*

centipoaz	1 cP		$= 10^{-3}$ Pa s
poaz (poise)	1 P		$= 10^{-1}$ Pa s
dekapoaz	1 daP		= 1 Pa s

11. *Za kinematičnu viskoznost*

centistoks	1 cSt	= 1 mm^2/s	$= 10^{-6}$ m^2/s
stoks (stokes)	1 St		$= 10^{-4}$ m^2/s

stupnjevi po Engleru °E:

°E	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
mm^2/s	1,00	1,82	2,82	3,92	5,08	6,25	7,41	9,66	11,8
°E	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
mm^2/s	16,7	21,1	29,5	37,4	45,2	52,9	60,8	68,4	76,0

Iznad 10 °E = 76 mm^2/s treba za svaki 1 °E dodati 7,6 mm^2/s.

12. *Za energiju, rad, toplinu*

kilopond-metar	1 kp m	= 9,80665 J
konjska snaga-sat	1 KM h (KS h)	$= 2{,}648 \cdot 10^6$ J
kalorija	1 cal	= 4,1868 J
kilokalorija	1 kcal	= 4186,8 J
litar-atmosfera	1 l at	= 98,0665 J
erg	1 erg	$= 10^{-7}$ J
foot-pound	1 ft.-lb.	= 1,3558 J
horse power-hour	1 HP h	$= 2{,}685 \cdot 10^6$ J
british thermal unit	1 BTU	$= 1{,}055 \cdot 10^3$ J

13. *Za snagu, toplinski tok*

kilopond-metar u sekundi	1 kp m/s	= 9,80665 W
konjska snaga	1 KM (KS)	= 735,499 W
kalorija u sekundi	1 cal/s	= 4,1868 W
kilokalorija na sat	1 kcal/h	= 1,163 W
erg u sekundi	1 erg/s	$= 10^{-7}$ W
foot-pound per second	1 ft.-lb./sec.	= 1,3558 W
horse power	1 HP	= 745,7 W
british thermal unit per hour	1 BTU/h	= 0,293 W

14. *Za temperaturu*

stupanj Fahrenheita (°F) je definiran temperaturama: ledište vode 32 °F, vrelište vode 212 °F. Preračunavanje na temperaturnoj skali

$$x\ °\mathrm{F} = \frac{5}{9}(x - 32)\ °\mathrm{C} = \frac{5}{9}(x - 32) + 273\ \mathrm{K}$$

15. *Za električne veličine*

za gustoću magnetskoga toka	1 gauss	$= 10^{-4}$ T
za magnetski tok	1 maxwell	$= 10^{-8}$ Wb
za magnetsku jakost polja	1 oersted	$= 10^3/4\pi$ A/m

16. *Za svjetlosne veličine*

za jakost svjetla	1 hefnerova svijeća		= 0,917 cd
	1 međunarodna svijeća		= 1,02 cd
za luminanciju	stilb	= 1 sb	$= 10^4$ cd/m^2
	nit	= 1 nt	= 1 cd/m^2
za rasvijetljenost	phot	= 1 ph	$= 10^4$ lx

17. *Za veličine zračenja*

za aktivnost radioaktivnoga izvora	curie	= 1 Ci	$= 3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
za apsorbiranu dozu ionizirajućeg zračenja	rad	= 1 rd	= 0,01 Gy
za ekvivalentnu dozu ionizirajućeg zračenja	rem	= 1 rem	= 0,01 Sv
za ekspozicijsku dozu ioniziranoga zračenja	röntgen	= 1 R	$= 2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C/kg

POSEBNE MJERE

1. **»Standardni (normni) kubni metar«** je masa plina koja pri standardnom stanju (pri temperaturi 0 °C i tlaku 1,013 25 bar) zaprema volumen od 1 m^3. To je masa plina (kg) koja je brojčano jednaka njegovoj gustoći (kg/m^3) pa ima stoga za svaki plin drugu vrijednost, npr.:

   1,2505 kg dušika   1,4290 kg kisika   1,9768 kg ugljičnog dioksida

   Volumen »standardnoga kubnog metra« je za različite temperature veoma različit pa iznosi za idealni plin

pri temperaturi	°C	−100	0	100	1000
volumen	m^3	0,634	1	1,366	4,663

   (Pritom nije uzeto u obzir odstupanje realnih plinova od ponašanja idealnih, niti njihova disocijacija pri visokim temperaturama.)

   »Standardni kubni metar« je nepregledna, zastarjela mjera (u jugoslavenskom zakonu o mjernim jedinicama i mjerilima uopće nije spomenuta).

2. **»Baumé-ova areometarska skala«** služi za određivanje gustoće kapljevina pomoću stupnjeva Baumé-a (°Bé).

   a) Za kapljevine gustoće $\varrho \geqq 1\ kg/dm^3$ određena je Bauméova skala vrijednostima N

   $N = 0$ °Bé pri $\varrho = 1,0\ kg/dm^3$
   $N = 66$ °Bé pri $\varrho = 1,8427\ kg/dm^3$

   Za preračunavanje vrijedi

   $$\varrho = 144,32/(144,32 - N) \quad (kg/dm^3)$$

   b) Za kapljevine gustoće $\varrho \leqq 1\ kg/dm^3$ određena je Bauméova skala vrijednostima N

   $N = 10$ °Bé pri $\varrho = 1,0\ kg/dm^3$
   $N = 90$ °Bé pri $\varrho = 0,6434\ kg/dm^3$

   Za preračunavanje vrijedi

   $$\varrho = 144,32/(134,32 + N) \quad (kg/dm^3)$$

3. **»Beaufortova skala«** označuje brzinu vjetra (u meteorologiji) pomoću posebne mjere »bofor« – u ovisnosti o brzini vjetra v:

bofor	v km/h		bofor	v km/h	
1	1 ... 5		7	50 ... 61	
2	6 ... 11	lahor	8	62 ... 74	olujni vjetar
3	12 ... 19		9	75 ... 88	
4	20 ... 28	vjetrić	10	89 ... 102	vihor
5	29 ... 38		11	103 ... 117	
6	39 ... 49	jači vjetar	12	> 117	orkan

TVARI

SASTAV TVARI

Tvar (materija) se sastoji od kemijskih *elemenata* ili njihovih *spojeva*. Sve spojeve možemo rastaviti na elemente koje dalje ne možemo rastavljati nikakvim kemijskim sredstvima.

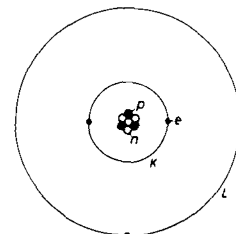
Dio elementa koji dalje ne možemo više dijeliti nazivamo *atom*. (Promjer atoma iznosi po redu veličine približno 0,1 nm = 10^{-10} m.)

Nuklearna je fizika po svojim otkrićima razvila (Bohrov) model o zgradi atoma, prema kojem se sastoji atom svakoga elementa od jezgre, gdje su sabrani *nukleoni*, tj. pozitivno nabijeni *protoni* i električki neutralni *neutroni*, a jezgru okružuju negativno nabijeni *elektroni*.

U jezgri atoma (promjera reda veličine ≈ 10^{-14} m) skupljena je gotovo sva masa atoma.

Mase i naboji nukleona i elektrona iznose:

	masa	naboj
proton	$1,672 \cdot 10^{-24}$ g	$+0,160 \cdot 10^{-18}$ As
neutron	$1,675 \cdot 10^{-24}$ g	0
elektron	$0,9108 \cdot 10^{-27}$ g	$-0,160 \cdot 10^{-18}$ As



p = protoni, n = neutroni, e = elektroni

Naboj jezgre određen je brojem protona koji je jednak »rednom broju Z« elementa. Tim su nabojem određena kemijska i fizikalna svojstva elementa.

Ukupan broj nukleona, tj. protona i neutrona, daje »maseni broj A« (relativnu atomsku masu) elementa.

Npr. uranov atom ($Z = 92$) relativne atomske mase $A = 238$ sastoji se iz 92 protona i 146 neutrona.

Pri električki neutralnim atomima je broj elektrona jednak broju protona (= rednom broju Z).

Elektroni kruže oko atomske jezgre po određenim stazama (kružnim odnosno eliptičnim) koje teku po energetski razmještenim *ljuskama* K, L, M, N, O, P i Q (kojih se polumjeri odnose kao kvadrati cijelih brojeva, tj. $1^2 : 2^2 : 3^2 : \ldots$). Broj elektrona u svakoj ljusci je ograničen ($2n^2$):

ljuska	K	L	M	N	O	P	Q
najveći broj elektrona	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)

Elektronima su sasvim popunjene samo ljuske K, L, M i N.

Kemijski elementi

Simbol, redni (atomski) broj Z (= broj protona u atomu), relativna atomska masa A (s obzirom na ugljikov izotop ^{12}C) i raspored elektrona po ljuskama (K do Q)

Element	Simbol	Z	A	K	L	M	N	O
vodik	H	1	1,008	1				
helij	He	2	4,003	2				
litij	Li	3	6,939	2	1			
berilij	Be	4	9,012	2	2			
bor	B	5	10,81	2	3			
ugljik	C	6	12,01	2	4			
dušik	N	7	14,01	2	5			
kisik	O	8	16,00	2	6			
fluor	F	9	19,00	2	7			
neon	Ne	10	20,18	2	8			
natrij	Na	11	22,99	2	8	1		
magnezij	Mg	12	24,31	2	8	2		
aluminij	Al	13	26,98	2	8	3		
silicij	Si	14	28,09	2	8	4		
fosfor	P	15	30,97	2	8	5		
sumpor	S	16	32,06	2	8	6		
klor	Cl	17	35,45	2	8	7		
argon	Ar	18	39,95	2	8	8		
kalij	K	19	39,10	2	8	8	1	
kalcij	Ca	20	40,08	2	8	8	2	
skandij	Sc	21	44,96	2	8	9	2	
titan	Ti	22	47,90	2	8	10	2	
vanadij	V	23	50,94	2	8	11	2	
krom	Cr	24	52,00	2	8	13	1	
mangan	Mn	25	54,94	2	8	13	2	
željezo	Fe	26	55,85	2	8	14	2	
kobalt	Co	27	58,93	2	8	15	2	
nikal	Ni	28	58,71	2	8	16	2	
bakar	Cu	29	63,54	2	8	18	1	
cink	Zn	30	65,37	2	8	18	2	
galij	Ga	31	69,72	2	8	18	3	
germanij	Ge	32	72,59	2	8	18	4	
arsen	As	33	74,92	2	8	18	5	
selen	Se	34	78,96	2	8	18	6	
brom	Br	35	79,91	2	8	18	7	
kripton	Kr	36	83,80	2	8	18	8	
rubidij	Rb	37	85,47	2	8	18	8	1
stroncij	Sr	38	87,62	2	8	18	8	2
itrij	Y	39	88,91	2	8	18	9	2
cirkonij	Zr	40	91,22	2	8	18	10	2
niobij	Nb	41	92,91	2	8	18	12	1
molibden	Mo	42	95,94	2	8	18	13	1
tehnecij	Tc	43	(99)	2	8	18	14	1
rutenij	Ru	44	101,1	2	8	18	15	1
rodij	Rh	45	102,9	2	8	18	16	1
paladij	Pd	46	106,4	2	8	18	18	

Element	Simbol	Z	A	K	L	M	N	O	P	Q
srebro	Ag	47	107,9	2	8	18	18	1		
kadmij	Cd	48	112,4	2	8	18	18	2		
indij	In	49	114,8	2	8	18	18	3		
kositar	Sn	50	118,7	2	8	18	18	4		
antimon	Sb	51	121,8	2	8	18	18	5		
telur	Te	52	127,6	2	8	18	18	6		
jod	J	53	126,9	2	8	18	18	7		
ksenon	Xe	54	131,3	2	8	18	18	8		
cezij	Cs	55	132,9	2	8	18	18	8	1	
barij	Ba	56	137,3	2	8	18	18	8	2	
lantan	La	57	138,9	2	8	18	18	9	2	
cer	Ce	58	140,1	2	8	18	20	8	2	
praseodim	Pr	59	140,9	2	8	18	21	8	2	
neodim	Nd	60	144,2	2	8	18	22	8	2	
prometij	Pm	61	(145)	2	8	18	23	8	2	
samarij	Sm	62	150,4	2	8	18	24	8	2	
europij	Eu	63	152,0	2	8	18	25	8	2	
gadolinij	Gd	64	157,3	2	8	18	25	9	2	
terbij	Tb	65	158,9	2	8	18	27	8	2	
disprozij	Dy	66	162,5	2	8	18	28	8	2	
holmij	Ho	67	164,9	2	8	18	29	8	2	
erbij	Er	68	167,3	2	8	18	30	8	2	
tulij	Tm	69	168,9	2	8	18	31	8	2	
iterbij	Yb	70	173,0	2	8	18	32	8	2	
lutecij	Lu	71	175,0	2	8	18	32	9	2	
hafnij	Hf	72	178,5	2	8	18	32	10	2	
tantal	Ta	73	180,9	2	8	18	32	11	2	
volfram	W	74	183,9	2	8	18	32	12	2	
renij	Re	75	186,2	2	8	18	32	13	2	
osmij	Os	76	190,2	2	8	18	32	14	2	
iridij	Ir	77	192,2	2	8	18	32	15	2	
platina	Pt	78	195,1	2	8	18	32	16	2	
zlato	Au	79	197,0	2	8	18	32	18	1	
živa	Hg	80	200,6	2	8	18	32	18	2	
talij	Tl	81	204,4	2	8	18	32	18	3	
olovo	Pb	82	207,2	2	8	18	32	18	4	
bizmut	Bi	83	209,0	2	8	18	32	18	5	
polonij	Po	84	(210)	2	8	18	32	18	6	
astat	At	85	(210)	2	8	18	32	18	7	
radon	Rn	86	(222)	2	8	18	32	18	8	
francij	Fr	87	(223)	2	8	18	32	18	8	1
radij	Ra	88	(226)	2	8	18	32	18	8	2
aktinij	Ac	89	(227)	2	8	18	32	18	9	2
torij	Th	90	232,0	2	8	18	32	18	10	2
protaktinij	Pa	91	(231)	2	8	18	32	20	9	2
uran	U	92	238,0	2	8	18	32	21	9	2

Transurani su umjetno dobiveni (radioaktivni) elementi, kojih u prirodi nema:

Element	Simbol	Z	A* ≈
neptunij	Np	93	(237)
plutonij	Pu	94	(242)
americij	Am	95	(243)
kirij (curij)	Cm	96	(247)
berkelij	Bk	97	(247)
kalifornij	Cf	98	(249)
ajnštajnij	Es	99	(254)
fermij	Fm	100	(253)
mendelevij	Md	101	(256)
nobelij	No	102	(253)
lavrencij	Lw	103	(257)
kurčatovij	Ku	104	(261)
hanij (borij)	Ha (Bo)	105	(262)

* Podaci se iz raznih izvora znatno razlikuju, a vrijede za najstabilniji izotop.

*

Pri jednakom rednom broju Z (tj. pri jednakom broju protona) moguće su različite atomske mase A (zbog različitog broja neutrona). Elemente s jednakim rednim brojem (s jednakim nabojem jezgre), ali s različitim relativnim atomskim masama (masenim brojevima), nazivamo *izotopima*. Izotopi se vladaju kemijski potpuno jednako; razlikuju se samo po fizikalnim svojstvima.

Pri vodiku npr. poznamo tri izotopa: vodik H = ^{1}H (s protonom i bez neutrona), deuterij D = ^{2}H (s protonom i jednim neutronom) i tritij T = ^{3}H (s protonom i dvama neutronima).

Prirodni se elementi sastoje većinom od stalne mješavine svojih izotopa, (Samo 22 prirodna elementa sastoje se od samo jednoga izotopa, npr. F, Na, Al, P, Co itd.). Na primjer: prirodni uran sadrži 99,280% izotopa ^{238}U, 0,714% izotopa ^{235}U i 0,006% izotopa ^{234}U.

*

Pri jednakom pozitivnom naboju jezgre (tj. pri jednakom broju protona) broj elektrona može biti veći ili manji. Takav atom, koji nije više električki neutralan, nazivamo *ion*.

Pozitivni ioni (*kationi*) nastaju od atoma, koji mogu odavati elektrone, tj. od takvih, koji imaju na vanjskoj ljusci samo jedan ili dva elektrona (pri elementima s većim brojem protona i više). To su tipične k o v i n e (dobro vode električnu struju). Većina kemijskih elemenata su kovine.

Negativni ioni (*anioni*) nastaju od atoma, koji mogu primati elektrone, tj. od takvih, koji imaju na vanjskoj ljusci sedam ili šest elektrona (pri elementima s malim brojem protona i manje). To su tipične n e k o v i n e (ne vode električnu struju).

Među elementima, koji formiraju samo katione ili anione, postoje elementi, koji pod određenim okolnostima formiraju jedne ili druge atome. Elementi sa četiri elektrona u vanjskoj ljusci samo ponekad formiraju ione.

Periodični sistem elemenata (po Mendeljejevu)

Brojevi povrh simbola su redni brojevi Z.

Oznaka +: elementi (kovine), koji tvore samo pozitivne ione (katione).

Oznaka —: elementi (nekovine), koji tvore samo negativne ione (anione).

Period	Glavna skupina							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H							2 He
2	3 + Li	4 Be	5 − B	6 − C	7 − N	8 − O	9 − F	10 Ne
3	11 + Na	12 + Mg	13 Al	14 − Si	15 − P	16 − S	17 − Cl	18 Ar
4	19 + K	20 + Ca	31 Ga	32 Ge	33 As	34 − Se	35 − Br	36 Kr
5	37 + Rb	38 + Sr	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 − J	54 Xe
6	55 + Cs	56 + Ba	81 Tl	82 Pb	83 + Bi	84 Po	85 − At	86 Rn
7	87 + Fr	88 + Ra						

Lijevo i pod debelom crtom — kovine; desno i iznad debele crte — nekovine.

Period	Sporedna skupina								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
4	29 + Cu	30 Zn	21 + Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 + Ni
5	47 + Ag	48 + Cd	39 + Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 + Rh	46 + Pd
6	79 + Au	80 + Hg	57 + La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 + Ir	78 + Pt
7			89 + Ac	104 Ku	105 Ha					

Z = 58 ... 71: lantanidi+, Z = 90 ... 103: aktinidi+.

U sporednoj skupini su svi elementi samo kovine.

Svojstva elemenata

Element skupina	Element simbol	Promjer atoma nm	Valencija*	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća (20 °C) kg/m³
	H	0,169	1	—259,4	—252,7	0,084
Alkalne kovine						
	Li	0,313	1	186	1 370	530
	Na	0,383	1	97,7	892	970
I	K	0,476	1	63	770	860
	Rb	0,502	1	39	680	1 530
	Cs	0,540	1	28	690	1 900
Zemno-alkalne kovine						
	Be	0,225	2	1 280	2 770	1 820
	Mg	0,320	2	650	1 110	1 740
II	Ca	0,393	2	850	1 440	1 550
	Sr	0,429	2	770	1 380	2 600
	Ba	0,448	2	704	1 640	3 500
Borova skupina						
	B		3	2 300	2 550	2 300
	Al	0,282	3	660,1	2 060	2 699
III	Ga	0,270	3	29,8	2 071	5 910
	In	0,314	3	156,4	1 450	7 310
	Tl	0,342	1, 3	300	1 460	11 850
Ugljikova skupina						
	C	0,154	4, 2	3 700	4 830	2 220
	Si	0,234	4	1 430	2 300	2 330
IV	Ge	0,279	4	958	2 700	5 360
	Sn	0,316	4, 2	231,9	2 270	7 298
	Pb	0,349	2, 4	327,3	1 740	11 340
Dušikova skupina						
	N	0,106	3, 5, 2	—210,0	—195,8	1,165
	P	0,216	5, 3	44,1	280	1 820
V	As	0,250	3, 5		610	5 730
	Sb	0,323	3, 5	630,5	1 440	6 620
	Bi	0,364	3, 5	271,3	1 420	9 800
Halkogeni						
	O		2	—218,8	—183,0	1,332
VI	S	0,212	6, 4, 2	119,0	444,6	2 070
	Se	0,232	4, 6, 2	220	680	4 810
	Te	0,290	2, 4, 6	450	1 390	6 240

* *Valencija* je broj vodikovih atoma koje atom elementa može vezati u molekulu ili ih u njoj može nadomjestiti.

Element skupina	Element simbol	Promjer atoma nm	Valencija	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća (20 °C) kg/m³
Halogeni						
	F	0,136	1	—223	—188,2	1,578
VII	Cl	0,194	1, 7, 5	—101	—34,7	3,000
	Br	0,226	1, 5	—7,2	58	3 120
	J	0,270	1, 5, 7	114	183	4 930
Plemeniti plinovi						
	He		0	—271,4	—268,9	0,166
	Ne	0,320	0	—248,6	—246,0	0,839
VIII	Ar	0,382	0	—189,4	—185,8	1,663
	Kr	0,400	0	—157	—152	3,488
	Xe	0,440	0	—112	—108	5,495
Kovine sporednih skupina						
	Ti	0,293	4, 3	1 820	5 100	4 540
	V	0,271	5, 4, 2	1 735	3 400	6 000
	Cr	0,257	3, 6, 2	1 930	2 500	7 190
	Mn	0,250	2, 3, 4	1 245	2 150	7 430
4. period	Fe	0,252	3, 2	1 539	2 740	7 870
	Co	0,250	2, 3	1 492	2 900	8 900
	Ni	0,249	2, 3	1 453	2 730	8 900
	Cu	0,255	2, 1	1 083	2 600	8 960
	Zn	0,275	2	419,5	906	7 133
	Zr	0,319	4	1 750	5 050	6 500
	Nb	0,294	5, 3	2 415	3 300	8 570
	Mo	0,280	6, 3, 5	2 625	4 800	10 200
	Tc		7			11 460
5. period	Ru	0,267	3, 4, 6	2 500	4 900	12 200
	Rh	0,270	3, 4	1 960	4 500	12 440
	Pd	0,275	2, 4	1 552	4 000	12 000
	Ag	0,288	1	960,8	2 210	10 490
	Cd	0,304	2	320,9	765	8 650
	Hf	0,317	4		3 700	11 400
	Ta	0,294	5	2 996	6 100	16 600
	W	0,282	6, 4	3 380	5 930	19 300
	Re	0,275	7, 4, 1	3 170	5 900	20 000
6. period	Os	0,270	4, 6	2 700	5 500	22 500
	Ir	0,271	4, 3, 6	2 443	5 300	22 500
	Pt	0,277	4, 2	1 769	4 410	21 450
	Au	0,288	1, 3	1 063	2 970	19 320
	Hg	0,310	2, 1	—38,9	356,6	13 550

KEMIJSKI SPOJEVI

Kemijske veze

1. *Atomske veze* (homeopolarne, kovalentne)

Atomske veze su veze među nekovinskim atomima. Zajednički elektroni više atoma tvore molekule, i to od priprostih dvoatomnih do vrlo velikih molekula s više stotina ili više tisuća atoma.

Spojevi s atomskim vezama (molekularnu zgradu) obuhvaćaju razmjerno manji broj anorganskih spojeva; posebno su značajni organski spojevi.

Anorganski spojevi s atomskim vezama su:

— pretežno plinovite tvari (s niskim talištima i vrelištima), npr. nekovinski elementi (H_2, O_2, N_2), nekovinski oksidi i hidridi (CO_2, SO_2, NH_3, H_2S) i spojevi nekovina (SCl_2, PCl_3);

— tvari dijamantnog tipa (s visokim talištima i vrelištima) s vrlo jakim atomskim vezama (tvrdoća!), npr. dijamant (C) i nekovinski karbidi (SiC, B_4C). Tima su slični također nekovinski nitridi (BN, Si_3N_4).

Organski spojevi sežu od malih molekula, npr. priprostih ugljikovodika (CH_4, C_2H_6), do veoma velikih molekula, npr. polivinilklorida $(C_2H_3Cl)_n$. S porastom broja atoma u molekuli prelaze te tvari iz plinovitih u tekuće i potom u krute. Ne vode električne struje.

2. *Ionske veze* (heteropolarne, elektrovalentne)

Ionske veze nastaju među kovinskim i nekovinskim atomima na taj način, da kovinski atomi odaju vanjske (valentne) elektrone (jednoga ili više) te postaju pozitivnim ionima — kationima, nekovinski atomi pak primaju vanjske elektrone i postaju negativnim ionima — anionima. U plinovitom ili tekućem stanju (ili u otopini) su pozitivni i negativni ioni slobodno gibljivi, dok u krutom stanju formiraju skupnu kristalnu rešetku.

Ionske su veze karakteristične za kovinske okside (npr. Na_2O) i hidrokside (npr. NaOH) a naročito za soli, koje su spojevi pozitivnih (kovinskih) i negativnih (nekovinskih) iona ($NaCl = Na^+ + Cl^-$).

Soli imaju visoka tališta i vrelišta te su pravi elektroliti; u taljevini ili otopini vode električnu struju, pri čemu su ioni nosioci naboja.

3. *Kovinske veze*

Kovinske veze su veze među kovinskim atomima.

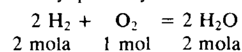
U kristalnim rešetkama, koje tvore sve kovine, su atomi — odavanjem valentnih elektrona — pozitivno nabijeni, valentni elektroni pa se kreću među njima u rešetki razmjerno slobodno.

Kovinske su veze karakteristične za sve kovine i njihove slitine, a odlikuju se naročito dobrom električnom i toplinskom vodljivošću te tvrdoćom i gnjetljivošću (mogućnost preoblikovanja, kovkost).

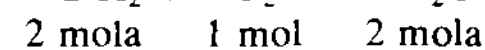
Kemijske reakcije

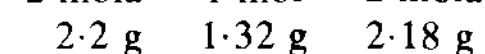
Jednadžbe kemijskih reakcija prikazuju količinske odnose sudjelujućih tvari

$$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O$$

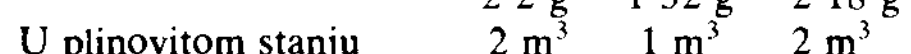


2 mola 1 mol 2 mola



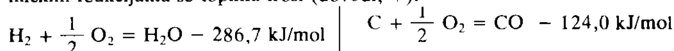


$2 \cdot 2$ g $1 \cdot 32$ g $2 \cdot 18$ g

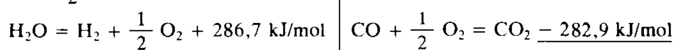


U plinovitom stanju $2\ m^3$ $1\ m^3$ $2\ m^3$

Pri eksotermičkim reakcijama se toplina oslobađa (odvodi, −), pri endotermičkim reakcijama se toplina troši (dovodi, +):



$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O - 286{,}7\ \text{kJ/mol} \qquad C + \frac{1}{2} O_2 = CO - 124{,}0\ \text{kJ/mol}$$



$$H_2O = H_2 + \frac{1}{2} O_2 + 286{,}7\ \text{kJ/mol} \qquad CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2 \underline{- 282{,}9\ \text{kJ/mol}}$$



$$C + O_2 = CO_2 - 406{,}9\ \text{kJ/mol}$$

Pri kemijskoj reakciji odvedena ili dovedena toplina nije ovisna o toku reakcije – po međustupnjevima ili neposredno (Hessov zakon).

Reakcije redukcija – oksidacija (»red-oks«) nastaju iz djelomičnih reakcija redukcije (oduzimanje kisika spoju) i oksidacije (spajanje s kisikom).

Hidridi

Hidridi su binarni spojevi vodika s nekovinama ili nekim kovinama. Hidridi su plinoviti, tekući ili kruti (nekovinski su hidridi plinoviti ili tekući).

Svojstva vodika i nekovinskih hidrida

Tvar	Relativna molekularna masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m^3 (0 °C)	Opaska
Vodik					
H_2	2,016	−259,4	−252,7	0,090	
Hidridi					
H_2O [1]	18,02	0,00	100,0	1000,0 (4 °C)	voda (H oksid)
H_2O_2 [1]	34,01	−89	152,1	1465	H peroksid
NH_3 [2]	17,03	−77,7	−33,35	0,771	amonijak
HF	20,01	−92,3	19,4	987	fluorovodik
HCl	36,46	−112	−83,7	1,64	klorovodik
HBr	80,92	−88,5	−67,0	3,50	bromovodik
HJ	127,91	−50,8	−35,4 (4 bar)	5,66	jodovodik
H_2S	34,08	−82,9	−61,8	1,54	sumporovodik
H_3P	34,00	−133,5	−87,4	1,53	fosforovodik
HCN [3]	27,03	−14	26	688	cijanovodik

[1] Voda i vodikov peroksid su istodobno hidrid i oksid.
[2] Pozitivno nabijena jednovaletna skupina NH_4^+ = »amonij«.
[3] Negativno nabijena jednovalentna skupina CN^- = »cijan«.

Oksidi

Oksidi su binarni spojevi kisika s elementima te su plinoviti, tekući ili kruti. Elementi s više valencija mogu imati i više različitih oksida.

Svojstva kisika i oksida (pri p_a = 1,01325 bar)

Tvar	Relat. molek. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m³ (0 °C)	Opaska
Kisik					
O_2	32,00	−218,8	−183,0	1,429	
Nekovinski oksidi					
CO	28,01	−207	−191,5	1,250	C monoksid
CO_2	44,01	−78,5 s	—	1,977	C dioksid
N_2O	44,01	−102,3	−91,7	1,978	N(I) oksid
NO	30,01	−161	−151	1,340	N(II) oksid, N monoksid
NO_2	46,01	−9,3	21,3	1447	N dioksid
N_2O_3	76,01	−103	3,5	1447	N(III) oksid, N trioksid
N_2O_5	108,01	30 s	—	2050	N pentoksid
SO_2	64,06	−75,5	−10,0	2,926	S dioksid
SO_3	80,06	16,8	44,5	1923	S trioksid
P_2O_3	109,95	23,8	173,1	1943	P trioksid
P_2O_5	141,94	250 s	—	2387	P pentoksid
SiO_2	60,08	1710	2630	2320	Si dioksid, kremen
Kovinski oksidi					
Na_2O	61,98	1275 s	—	2270	
K_2O	94,20	350	—	2320	
MgO	40,31	2500	—	3550	magnezija
CaO	56,08	2572 s	—	3400	pečeno (živo) vapno
BaO	153,34	1923	2000	5720	
Al_2O_3	101,96	2050	2250	4000	glinica, korund
CrO	68,00	—	—	—	Cr(II) oksid
Cr_2O_3	151,99	2200	—	5210	Cr(III) oksid
CrO_3	99,99	196	—	2800	Cr(IV) oksid
Cu_2O	143,08	1235	—	6000	Cu(I) oksid
CuO	79,54	—	—	6400	Cu(II) oksid
FeO	71,85	1420	—	5990	Fe(II) oksid
Fe_2O_3	159,69	1595	—	5240	Fe(III) oksid
Fe_3O_4	231,54	1538	—	5180	Fe(II), Fe(III) oksid
MnO	70,94	1650	—	5090	Mn(II) oksid
Mn_2O_3	157,87	1080	—	4500	Mn(III) oksid
Mn_3O_4	228,81	1705	—	4856	Mn(II), Mn(III) oksid
MnO_2	86,94	535	—	5026	Mn(IV) oksid
PbO	223,19	—	—	9500	Pb(II) oksid
PbO_2	239,19	—	—	9365	Pb(IV) oksid
TiO	63,90	1750	—	5500	
WO_2	215,90	—	—	12110	W(IV) oksid
WO_3	231,90	1373	—	7160	W(VI) oksid
ZnO	81,37	1700 s	—	5606	cinkovo bjelilo

Karbidi

Karbidi su binarni spojevi ugljika s kovinama, te s nekovinama B i Si. Karbidi su tvrde (i vrlo tvrde) tvari visokog tališta.

Svojstva ugljika i karbida

Tvar	Relativna molek. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m³ (0 °C)	Opaska
Ugljik					
grafit	12,01	3700	4830	2220	gustoća amorfnoga C:
dijamant	12,01	> 3500	—	3510	1970 kg/m³
Karbidi					
B_4C	55,25	2350	3500	2515	brusni materijal
SiC	40,10	2700 s	—	3170	karborund
CaC_2	64,10	2300	—	2220	s vodom: C_2H_2
Cr_3C_2	180,01	1890	—	6680	
Cr_5C_2	284,00	1665	—	6950	
Fe_3C	179,55	1837	—	7680	cementit
Mn_3C	176,83	—	—	6890	
MoC	107,95	2570	—	8400	
NbC	104,92	3500	—	8200	u čelicima
TaC	192,96	3877	5500	13960	
TiC	59,91	3140	4300	4250	
VC	62,95	2830	3900	5380	
WC	195,86	2777	—	15700	karbidni
W_2C	379,71	2857	—	16060	tvrdi metali

Nitridi

Nitridi su binarni spojevi dušika s kovinama, među nekovinama pak naročito s B.

Svojstva dušika i nitrida

Tvar	Relativna molek. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m³ (0 °C)	Opaska
Dušik					
N_2	28,01	−209,86	−195,8	1,251	
Nitridi					
BN	24,82	2730 s	—	2255	
AlN	40,99	2200 (4 bar)	—	3050	
CrN	66,00	1500	—	—	
Fe_2N	125,70	200	—	6350	
Fe_4N	237,39	—	—	6570	u čelicima za nitriranje
NbN	106,91	2050	—	8260	
TaN	194,95	3360	—	14100	
TiN	61,91	3220	—	5190	
VN	64,95	2320	—	5630	

Sulfidi

Sulfidi su binarni spojevi sumpora s kovinama, a među nekovinama naročito sa C (i H – vidi: hidridi, str. 83).

Svojstva sumpora i sulfida

Tvar	Relativna molekul. masa	Talište °C	Vrelište °C (s = subl.)	Gustoća kg/m^3	Opaska
Sumpor					
amorfan	32,06	120	444,6	2046	
kristaličan	256,48	119,0	444,6	1960	monoklin
		112,8	–	2070	ortoromban
Sulfidi					
CS_2	76,13	−111,6	46,3	1261	
Al_2S_3	150,12	1110	1550 s	2020	
CrS	84,07	1350	–	4100	
Cu_2S	159,20	1100	–	5600	ortoromban
		1130	–	5780	kubičan
CuS	95,63	–	220	4600	
FeS	87,90	1193	–	5010	
FeS_2	119,96	1171	–	5000	pirit
MnS	86,99	–	1375 s	4000	
MoS_2	160,07	1185	–	4800	
PbS	239,27	1114	–	7500	
SnS	150,76	882	1240	5080	
WS_2	248,04	–	–	7500	
ZnS	97,44	1850 (150 bar)	1200 s	4087	

Fosfidi

Fosfidi su birani spojevi fosfora s kovinama.

Svojstva fosfora i fosfida

Tvar	Relativna molekul. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m^3	Opaska
Fosfor					
crni	123,92	–	–	2690	plamište 400 °C
crveni	123,92	610 (43 bar)	–	2200	plamište 725 °C
bijeli	123,92	44,1	280	1820	
Fosfidi					
CrP	83,03	–	–	5700	
Cu_3P	221,73	–	–	6700	
Cu_3P_2	252,75	–	–	6350	
SnP_3	211,76	415	–	4100	
Fe_2P	142,70	1290	–	6560	
Fe_3P	198,54	1100	–	6740	
MnP	85,95	1190	–	5390	

Kiseline i baze

Kiseline su tvari, kojih molekule ili ioni lako odavaju protone (vodikove jezgre H^+).

Kiseline su vodene otopine spojeva vodika s halogenima ili drugim nekovinama (»kiseline bez kisika«), ili pak nastaju pri reakciji nekovinskih oksida s vodom (»kiseline s kisikom«), npr.:

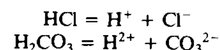
— *kiseline bez kisika*

fluorovodična	= vodena otopina HF
klorovodična (solna)	= vodena otopina HCl
bromovodična	= vodena otopina HBr
jodovodična	= vodena otopina HJ
sumporovodična	= vodena otopina H_2S
fosforovodična	= vodena otopina H_3P
cijanovodična	= vodena otopina HCN

— *kiseline s kisikom*

ugljična	H_2CO_3	$(CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3)$
sumporasta	H_2SO_3	$(SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3)$
sumporna	H_2SO_4	$(SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4)$
dušična	HNO_3	$(N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2\,HNO_3)$
fosforna	H_3PO_4	$(P_2O_5 + 3\,H_2O \rightarrow 2\,H_3PO_4)$

Karakteristični sastojak svih kiselina je vodik, koji je u vodenoj otopini pozitivno nabijen ion H^+, dok je drugi dio kiseline negativno nabijena nekovina ili atomska skupina:



$$HCl = H^+ + Cl^-$$
$$H_2CO_3 = H^{2+} + CO_3^{2-}$$

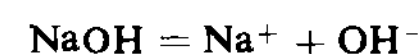
Baze (lužine) su spojevi, kojih molekule ili ioni lako primaju protone.

Baze su hidroksidi, koji nastaju pri reakciji određenih kovina, kovinskih oksida ili amonijaka s vodom, npr.

natrijev hidroksid	NaOH	$2\,Na + 2\,H_2O \rightarrow 2\,NaOH + H_2\uparrow$
		$Na_2O + H_2O \rightarrow 2\,NaOH$
kalijev hidroksid	KOH	$2\,K + 2\,H_2O \rightarrow 2\,KOH + H_2\uparrow$
		$K_2O + H_2O \rightarrow 2\,KOH$
kalcijev hidroksid	$Ca(OH)_2$	$Ca + 2\,H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2\uparrow$
(gašeno vapno)		$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$
amonijev hidroksid	NH_4OH	$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4OH$

Karakteristična sastavina baza je negativno nabijena jednovalentna skupina OH^- — »hidroksil«.

Vodene otopine baza sadrže pozitivne kovinske ione i negativne hidroksilne skupine (te su dobri vodiči električne struje), što vrijedi *i* za taljevine baza:



$$NaOH = Na^+ + OH^-$$

Svojstva kiselina i baza

Kiselina = vodena otopina	Topivost (0 °C)		Kiselina = vodena otopina	Topivost (0 °C)	
	g/kg vode	koncentracija max. %		g/kg vode	koncentracija max. %
HF	∞	100	H_2S	6,7	0,67
HCl	823	45	H_3P	0,4	0,04
HBr	2210	69	CO_2	3,4	0,34
HJ	2,4	0,24	SO_2	228	18,6
HCN	∞	100			

Tvar	Relativna molek. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m^3 (0 °C)	Opaska
Kiseline					
H_2SO_4	98,08	10,5	—	1834	sumporna kiselina
HNO_3	63,02	—42	86	1508	dušična kiselina
H_3PO_4	98,00	42,35	213	1834	fosforna kiselina
$HClO_4$	100,47	—112	(39)	1764	klorna kiselina (eksplozivna)
Baze					vodene otopine:
NaOH	40,00	318,4	1388	2130	— natrijeva lužina
KOH	56,11	360,4	1320	2044	— kalijeva lužina
$Ca(OH)_2$	74,10	580	—	2239	— gašeno vapno
NH_4OH	35,05	—77	—	—	— amonijačna vodica

Vrijednost pH

Mjera za stupanj kiselosti vodenih otopina je »vrijednost pH« (= *potentia hydrogenii*), koja je definirana negativnim dekadskim logaritmom koncentracije vodikovih iona a ($mol \cdot l^{-1}$):

$$pH = -\lg a$$

Otuda proizlaze vrijednosti:

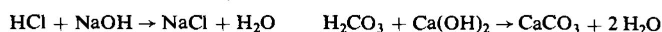
— za kisele otopine $a > 10^{-7}$ $pH < 7$
— za neutralne otopine (čista voda) $a = 10^{-7}$ $pH = 7$
— za bazične otopine $a < 10^{-7}$ $pH > 7$ (... 14)

Vrijednost pH mjerimo pomoću elektrokemijskih mjerila, a možemo je ocijeniti raznobojnim indikatorima koji pri određenoj vrijednosti pH promijene boju, npr.:

Indikator	pH
metiloranž	crven 3 — 4,4 žut
metilno crvenilo	crveno 4,4— 6,2 žuto
lakmus	crven 5 — 8 modar
bromtimol (modri)	žut 6 — 7,5 modar
fenolftalein	bezbojan 8 —10 crven

Soli

Soli nastaju pri reakciji kiseline s bazom:



$HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O$ $H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O$

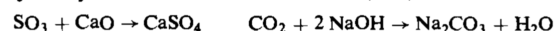
Soli nastaju i pri:

— djelovanju halogena na kovine



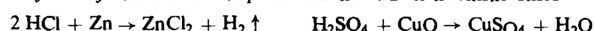
$Cl_2 + 2\,Na \rightarrow 2\,NaCl$

— djelovanju nekovinskih oksida na kovinske okside ili baze



$SO_3 + CaO \rightarrow CaSO_4$ $CO_2 + 2\,NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$

— djelovanju kiselina na neplemenitu kovinu ili kovinski oksid



$2\,HCl + Zn \rightarrow ZnCl_2 + H_2\uparrow$ $H_2SO_4 + CuO \rightarrow CuSO_4 + H_2O$

Nazivi za soli

Imena soli iz kiselina bez kisika svršavaju na -id:

CaF_2 — Ca fluorid
NaCl — Na klorid
AgBr — Ag bromid
KJ — K jodid
PbS — Pb sulfid
Cu_3P — Cu fosfid
KCN — K cijanid
$K_4Fe(CN)_6$ — K Fe(II) cijanid
$K_3Fe(CN)_6$ — K Fe(III) cijanid

Imena soli iz kiselina s kisikom svršavaju na -at (it):

Na_2CO_3 — Na karbonat
$NaHCO_3$ — Na hidrokarbonat
Na_2SO_3 — Na sulfit
Na_2SO_4 — Na sulfat
$Na_2S_2O_3$ — Na tiosulfat
$NaNO_3$ — Na nitrat
Na_3PO_4 — Na fosfat
Na_2HPO_4 — Na hidrofosfat
NaH_2PO_4 — Na bihidrofosfat
$KClO_4$ — K klorat
K_2SiO_3 — K silikat
K_2CrO_4 — K kromat
$K_2Cr_2O_7$ — K bikromat
$KMnO_4$ — K manganat
$KAl(SO_4)_2$ — K Al sulfat

Posebno značajne alkalne soli

Sol	Na	K	Ca	Ba	NH_4^+
klorid	NaCl kuhinjska sol	KCl	$CaCl_2$	$BaCl_2$	NH_4Cl salmijak
karbonat	Na_2CO_3 kalcinirana soda	K_2CO_3 potaša	$CaCO_3$ vapnenac	$BaCO_3$	$(NH_4)_2CO_3$
sulfat	Na_2SO_4	K_2SO_4	$CaSO_4$ sadra	$BaSO_4$ barit	$(NH_4)_2SO_4$
nitrat	$NaNO_3$ čilska salitra	KNO_3 indijska salitra			NH_4NO_3

Svojstva soli

Sol	Relat. molek. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m³ (0 °C)	Opaska
$BaCl_2$	208,25	962	1560	3856	
$BaCO_3$	197,35	1380	—	4430	
$BaSO_4$	233,40	1453	—	4500	baritno bjelilo
$Ba(NO_3)_2$	261,35	595	—	3245	
$BaCrO_4$	253,33	—	—	4600	
$CaCl_2$	110,99	782	1600	2152	
$CaCO_3$	100,09	898,6 s	—	2711	vapnenac, kreda
$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	184,41	—	—	—	dolomit
$CaSO_4$	136,14	1450	—	2960	sadra (gips)
$CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$	172,16	128	163	2320	
$Ca_3(PO_4)_2$	310,14	1670	—	3080	
$CaHPO_4 \cdot 2\,H_2O$	172,09	25	100	2316	
$CaCrO_4 \cdot 2\,H_2O$	192,10	200	—	—	
$CaSiO_3$	116,16	1540	—	2905	
$CuCl_2$	134,45	498	993	3054	
CuS	95,60	103	220	4600	
$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	221,08	200	—	4000	
$CuSO_4$	159,60	200	650	3600	
$CuSO_4 \cdot 5\,H_2O$	249,68	110	150	2284	modra galica
$FeCl_2$	126,75	672	1023	2988	Fe(II) klorid
$FeCl_3$	162,21	282	315	2894	Fe(III) klorid
$FeSO_4 \cdot H_2O$	169,92	—	—	3040	
$FeSO_4 \cdot 7\,H_2O$	278,02	64	300	1898	zelena galica
KCl	74,56	776	1417	1989	
KCN	65,12	634,5	—	1560	cijankalij
$KHCO_3$	100,12	150	—	2180	K. bikarbonat
K_2CO_3	138,21	896	—	2267	pepeljika (potaša)
K_2SO_4	174,27	588	1069	2664	
KNO_3	101,11	337	400	2100	indijska salitra
K_3PO_4	212,28	1340	—	2564	
K_2HPO_4	174,18	—	—	—	
KH_2PO_4	136,09	252,6	300	2338	
$KClO_4$	138,55	610	—	2525	
K_2SiO_3	154,29	976	—	—	
$KMnO_4$	158,04	240	—	2703	permanganat
K_2CrO_4	194,20	968	—	2732	
$K_2Cr_2O_7$	294,19	236	500	2690	

Sol	Relat. molek. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m³ (0 °C)	Opaska
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12\,H_2O$	474,39	92	—	1750	stipsa (alaun)
$K_3Fe(CN)_6$	329,26	—	—	1894	crvena krvna sol
$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3\,H_2O$	422,41	70	—	1850	žuta krvna sol
$MgCl_2$	95,22	712	1412	2316	
$MgCO_3$	84,32	350	900	3010	magnezit
$MgSO_4$	120,37	1124	—	2660	
$MgSO_4 \cdot 7\,H_2O$	246,48	150	200	1636	gorka sol
NaF	41,99	993	1702	2790	
$NaCl$	58,44	801	1449	2165	kuhinjska sol
$NaBr$	102,90	756	1393	3203	
NaJ	149,89	665	1300	3665	
$NaCN$	49,01	563,7	1500	—	
$NaHCO_3$	84,01	270	—	2221	soda bikarbona
Na_2CO_3	105,99	860	—	2533	kalcinirana soda
$Na_2CO_3 \cdot 10\,H_2O$	286,14	—	—	1446	kristalna soda
Na_2SO_4	142,04	884	—	2698	
$Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O$	322,19	—	—	1465	Glauberova sol
$NaNO_3$	84,99	306,8	380	2267	čilska salitra
$Na_3PO_4 \cdot 10\,H_2O$	344,09	100	—	2536	
$Na_2HPO_4 \cdot 2\,H_2O$	177,99	95	—	2066	
$NaH_2PO_4 \cdot H_2O$	137,99	100	200	1910	
Na_2SiO_3	122,06	1088	—	2400	
$Na_2S_2O_3 \cdot 5\,H_2O$	248,18	48	70	1750	fiksirna sol
NH_4Cl	53,49	—	—	1527	salmijak (nišador)
NH_4Br	97,95	542 s	—	2429	bijela sol (fot.)
NH_4HCO_3	79,06	107,5	—	1573	
$(NH_4)_2CO_3 \cdot H_2O$	114,10	60	—	—	
$(NH_4)_2SO_4$	132,14	100	—	1770	
NH_4NO_3	80,04	169,6	210	1725	umjetno gnojivo
$(NH_4)_2HPO_4$	132,06	—	—	1619	
$NH_4H_2PO_4$	115,03	—	—	1794	
PbS	239,25	1114	—	7500	
$PbSO_4$	303,25	1000	—	6380	
$PbCrO_4$	323,18	844	—	6300	
$ZnCl_2$	136,28	283	730	2910	
ZnS	97,43	1020	—	4102	
$ZnCO_3$	125,38	300	—	4440	

Organski spojevi

U svim organskim spojevima sadržan je ugljik. Međutim, u organske spojeve ne ubrajamo slijedeće anorganske spojeve sa C:

ugljične okside	CO, CO_2	ugljični disulfid	CS_2
ugljičnu kiselinu	H_2CO_3	cijanovodik	CN
karbonate npr.	$CaCO_3$	cijanide	npr. KCN
karbide npr.	CaC_2	i sl.	

Organski su spojevi najčešće sastavljeni od ugljika i vodika (ugljikovodici), često još i s N i S. U principu su u organskim spojevima mogući svi elementi. U organskim spojevima prevladavaju u prvom redu atomske veze.

Nazivi organskih spojeva po broju atoma C u molekuli:

1 atom:	met-	5 atoma:	pent-	9 atoma:	non-
2 atoma:	et-	6 atoma:	heks-	10 atoma:	dek-
3 atoma:	prop-	7 atoma:	hept-		
4 atoma:	but-	8 atoma:	okt-		

Za molekule organskih spojeva karakteristična je atomska struktura ugljika, koji se veže u lance (lančani = aciklički, alifatski spojevi) ili u kolute (kolutni = ciklični spojevi). Molekule jednakog sastava mogu imati različne strukture (izomeri).

```
butan C4H10            izobutan C4H10        ciklobutan C4H8

 H  H  H  H              H  H  H               H  H
 |  |  |  |              |  |  |               |  |
H-C--C--C--C-H         H-C--C--C-H           H-C--C-H
 |  |  |  |              |  |  |               |  |
 H  H  H  H              H  |  H             H-C--C-H
                          H-C-H                |  |
                            |                  H  H
CH3—CH2—CH2—CH3             H
```

Ugljikovodici mogu biti:

- zasićeni — alkani, npr. etan CH_3-CH_3
- nezasićeni: s dvojnim vezama — alkeni, npr. eten $CH_2=CH_2$
- s trojnim vezama — alkini, npr. etin $CH\equiv CH$

Nezasićeni ugljikovodici teže pretvorbi u spojeve sa stabilnijom vezom (u zasićene). Stoga su nezasićeni ugljikovodici kemijski vrlo aktivni pa se također spajaju u velike molekule (polimeri).

Alikili (opća oznaka -R) su atomske skupine koje imaju jedan vodikov atom manje nego li odgovarajući alkani, npr.

metil	$—CH_3$	propil	$—C_3H_7$	pentil (amil)	$—C_5H_{11}$
etil	$—C_2H_5$	butil	$—C_4H_9$		

Organske spojeve koji, osim C i H, sadrže i druge elemente, možemo razvrstati s obzirom na karakteristične skupine atoma (prema kojima imaju i slična kemijska svojstva).

Sistemske skupine organskih spojeva

Skupina		Broj atoma C u molekuli		
ime	karakteristični sastav	1	2	3
alkani (parafini)	C_nH_{2n+2}	CH_4 metan	C_2H_6 etan	C_3H_8 propan
alkeni (olefini)	C_nH_{2n}	—	C_2H_4 eten	C_3H_6 propen
alkini (acetileni)	C_nH_{2n-2}	—	C_2H_2 etin (acetilen)	C_3H_4 propin
alkanoli (alkoholi)	—OH (hidroksil)	CH_3OH metanol (metilalkohol)	C_2H_5OH etanol (etilalkohol)	C_3H_7OH propanol (propilalkohol)
alkanali (aldehidi)	—CHO (aldehidna skupina)	HCHO metanal (formaldehid)	CH_3CHO etanal (acetaldehid)	C_2H_5CHO propanal
alkanske kisline (karbonske k.)	—COOH (karboksil)	HCOOH metanska k. (mravlja k.)	CH_3COOH etanska k. (octena k.)	C_2H_5COOH propanska k.
alkanoni (ketoni)	—CO— (karbonil)			$(CH_3)_2CO$ propanon (aceton)

Primjeri značajnih organskih skupina

Spoj	Karakteristična atomska skupina	Primjer	
eteri	—O—	$C_2H_5—O—C_2H_5$	dietileter
esteri	—COO—	$CH_3—COO—CH_3$	metiletanat
epoksidi	=C—O—C= (epoksidni prsten)	$CH_2Cl—HC—O—CH_2$ (epoksidni prsten)	klorepoksipropan
amini	$—NH_2$	$C_2H_5—NH_2$	etilamin
amidi	$—CONH_2$	$C_2H_5—CONH_2$	propanamid
nitrili	—CN	$CH_2=CH—CN$ ($CH_2=CH$ = vinil)	propennitril (vinilcianid)

Aromatični ugljikovodici (benzenskog tipa)

benzen (benzol) C_6H_6

```
    CH—CH
CH<       >CH      (fenil —C6H5)
    CH=CH
```

C_6H_5OH	fenol	$C_6H_4(CH_3)_2$	ksilol
$C_6H_5CH_3$	toluol	$C_6H_4(COOH)_2$	tereftalna kiselina
$C_6H_5C_2H_3$	stirol		
$C_6H_5SO_3H$	sulfonska kislina		

Spoj		Relat. molek. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m^3 (0 °C)	Opaska
metan	CH_4	16,04	—182,5	—161,7	0,717	
etan	C_2H_6	30,07	—172	—88,6	1,356	
propan	C_3H_8	44,10	—187,7	—42,1	2,019	
n-butan	C_4H_{10}	58,12	—138,3	—0,5	2,703	
izobutan	C_4H_{10}	58,12	—159,6	—11,7	2,668	
ciklobutan	C_4H_8	56,11	—50	10*	703	
n-oktan	C_8H_{18}	114,23	—57,0	125,8	764	
izooktan	C_8H_{18}	114,23	—107,4	99,3	691	
eten	C_2H_4	28,05	—169	—103,5	1,260	»etilen«[1]
propen	C_3H_6	42,08	—185,3	—47,7	1,915	»propilen«[1]
buten	C_4H_8	56,05	—130	—6,5	2,500	»butilen«[1]
ciklobuten	C_4H_6	54,09	—1	2**	733	
etin	C_2H_2	26,04	—81,5	—83,6	1,171	acetilen
propin	C_3H_4	40,07	—102,7	—23,2	—	
butin	C_4H_6	54,09	—32,2	27	693	
metanol	CH_3OH	32,04	—97,8	64,7	792	metilalkohol
etanol	C_2H_5OH	46,07	—112	78,4	789	etilalkohol
propanol	C_3H_7OH	60,10	—127	97,8	804	propilalkohol
butanol	C_4H_9OH	74,12	—79,9	117	810	butilalkohol
metanal	$HCHO$	30,03	—92	—21	—	formaldehid[2]
etanal	CH_3CHO	44,05	—123,5	20,2	783	
propanal	C_2H_5CHO	58,08	—81	49,5	807	
butanal	C_3H_7CHO	72,11	—99	75,7	817	
metanska kiselina	$HCOOH$	46,03	8,6	100,8	1220	mravlja kiselina
etanska kiselina	CH_3COOH	60,05	16	118,1	1049	octena kiselina
propanska kiselina	C_2H_5COOH	74,08	—22	141,1	992	
butanska kiselina	C_3H_7COOH	88,11	—4,7	164	964	maslačna kiselina
propanon	$(CH_3)_2CO$	58,08	—94,6	56,5	792	aceton
propantriol	$(CH_2OH)_2CHOH$	92,09	17,9	290	1260	glicerin
monoklor-metan	CH_3Cl	50,49	—97,7	—24	1,785	metil-klorid
diklor-metan	CH_2Cl_2	84,93	—96,7	—40	1,336	metilen-klorid
triklor-metan	$CHCl_3$	119,38	—63,5	61,2	1489	kloro-form
tetraklor-metan	CCl_4	153,82	—22,6	76,8	1595	
monofluor-triklorm.	$CFCl_3$	137,37	—111	24,9	1494	R 11 freon 11
difluordi-klormetan	CF_2Cl_2	120,91	—155	—29,2	—	R 12 freon 12
monofluor-diklorm.	$CHFCl_2$	102,92	—127	14,5	1426	R 21
monoklor-etan	C_2H_5Cl	64,52	—139	13	917	etilklorid
monoklor-eten	C_2H_3Cl	62,50	—160	—12	0,908	vinil-klorid
naftalen	$C_{10}H_8$	128,18	80,2	217,9	1145	naftalin
benzen	C_6H_6	78,11	5,5	80,1	879	»benzol«
hidroksi-benzen	C_6H_5OH	94,11	42	182	1071	fenol
amino-benzen	$C_6H_5NH_2$	93,13	—6,2	184,4	1022	anilin
eter	$(C_2H_5)_2O$	74,12	—116,3	34,6	708	
etandiol	$C_2H_4(OH)_2$	62,07	—15,6	197,4	1113	glikol
fenol-ftalein	$C_{20}H_{14}O_4$	318,33	261	—	1299	
celuloza	$(C_6H_{10}O_5)_n$	$(162,14)_n$	—	—	1350	
glukoza	$C_6H_{12}O_6$	180,16	146	—	1544	dekstroza
saharin	$C_7H_5O_3NS$	183,19	226 s	—	—	
salicilna kis.	HOC_6H_4COOH	138,12	159	—	1443	salicil
fosgen	$COCl_2$	98,92	—104	8,2	1,392	
iperit	$(C_2H_4Cl)_2S$	159,08	14	216	1279	
gliceril-nitrat	$(O_2NO)_3C_3H_5$	227,09	13,3	160 (20 mbar)	1601	nitro-glicerin
trinitro-toluen	$(NO_2)_3C_6H_2CH_3$	227,13	81	280 ekspl.	1654	trotil (TNT)

[1] Zastarjela imena! [2] Rastopina formaldehida u vodi = formalin.
* 968 mbar. ** 972 mbar.

Polimeri

Polimeri (umjetni organski spojevi) su makromolekularni organski spojevi koji nastaju nizanjem molekula osnovnih tvari – monomera – u makromolekule s vrlo velikim brojem atoma (do 1000 i više). Relativna molekularna masa polimera iznosi prosječno oko 10^4 do 10^7.

Brojem molekula – monomera, od kojih se sastoji molekula polimera, je određen *stupanj polimerizacije*. S porastom stupnja polimerizacije mijenjaju se i svojstva polimera (viskoznost, mogućnost preoblikovanja, čvrstoća, topivost itd.).

Pojedine molekule polimera nisu jednake veličine. Stoga se stupanj polimerizacije može smatrati samo prosječnim. Budući da je broj kemijski vezanih molekula (monomera) u molekuli polimera vrlo velik, to manje razlike u veličini makromolekula neće bitno utjecati na promjenu njihovih svojstava.

Najobičniji oblik makromolekule proizlazi iz lančanog nizanja monomera.

Polimere dobivamo iz monomera sintetički ili pretvorbom prirodnih tvari. Glavni postupci za dobivanje polimera su:

a) *Polimerizacija* je organska kemijska reakcija spajanja jednakih ili različitih nezasićenih spojeva s malenim molekulama u makromolekularne tvari, i to bez nastajanja nusprodukata.

b) *Polikondenzacija* je kemijska reakcija pri kojoj se osnovne tvari s malenim molekulama vežu u makromolekule uz izlučivanje nusprodukata (naročito vode, alkanola, halogenida).

c) *Poliadicija* je organska kemijska reakcija spajanja različitih spojeva s malenim molekulama u makromolekularne tvari, bez nastajanja nusprodukata.

Kopolimerizacija je polimerizacija barem dvaju različnih monomera, pričem nastaju makromolekule koje sadrže međusobno povezane monomerne molekule kao osnovne skupine.

Kopolimerizacijom nastaju polimerne tvari čija svojstva mogu biti u širokim granicama prilagođena potrebama za njihovu primjenu.

Primjeri najznačajnijih polimera:

celuloza	$(C_6H_{10}O_5)_n$	polietilen	$(C_2H_4)_n$
naravni kaučuk	$(C_5H_8)_n$	polipropilen	$(C_3H_6)_n$
sintetički kaučuk:		polistirol	$(C_8H_8)_n$
– buna S	$(C_{12}H_{14})_n$	polivinilklorid	$(C_2H_3Cl)_n$
– buna N	$(C_7H_9N)_n$	poliakrilnitril	$(C_3H_3N)_n$
silikon	$(RSiO_2)_n$	poliamid	$(C_6H_{11}ON)_n$

Pregled tvari

Čiste tvari	*elementi*	čisti elementi (samo jedan red atoma)		jedna faza
		miješani elementi (najmanje dva izotopa)		
	spojevi	anorganski spojevi		
		organski spojevi		
Smjese (disperzni sistemi)	*homogene smjese* (moleku-larna disperzija) veličina čestica < 1 nm	plinovite smjese (zrak)		
		(prave) otopine	tekuće otopine — plinova (CO_2 u vodi) — tekućina (alkohol u vodi) — krutina (sol u vodi)	
			krute otopine — otopinski kristali (austenit)	
	heterogene smjese — jedna tvar u raznim fazama (voda i led) ili — više tvari (voda *i* ulje) veličina čestica > 1 nm	koloidne otopine veličina čestica 1...100 nm	plinoviti dispergenti (aerosoli) — tekućina (magla) — krutina (dim, prah)	više faza
			tekući dispergenti — plinova: koloidna pjena (sapunica) — tekućina: koloidna emulzija (mlijeko) — krutina: koloidna otopina	
			kruti dispergenti — plinova, — tekućina: krute pjene (plovućac) — krutina: koloidni eutektik	
		suspenzije veličina čestica > 100 nm		

Taloženje (sedimentacija) (čestice se talože zbog težine ili pomoću centrifuge):

– grubodisperzne suspenzije lako se talože,
– koloidne otopine taložе se pomoću (ultra)centrifuge,
– prave se otopine ne taložе.

Filtriranje:

– suspenzije se filtriraju kroz obične filtre (otvori očica 100 nm),
– koloidi se filtriraju kroz specijalne filtre (otvori očica 1 nm),
– prave se otopine ne mogu filtrirati.

MEHANIKA

Masa i težina

M a s a m (kg) je svojstvo tijela koje se očituje u ustrajnosti protiv promjena gibanja i u uzajamnom privlačenju drugih tijela. Masu određujemo uspoređivanjem s drugim tijelima poznate mase (tj. vaganjem pomoću utega). Masa se ne mijenja s promjenom položaja.

Masa je također vaganjem određena količina tvari.

G u s t o ć a ϱ (kg/m^3) je odnos mase m i volumena V: $\varrho = m/V$.

Gustoćom izražena masa: $m = \varrho V$.

T e ž i n a G (N) je sila, kojom Zemlja privlači tijela. Određena je masom m tijela i ubrzanjem zemaljske sile teže $g = 9{,}80665$ m/s^2; $G = mg$.

Težina nije konstantna, već se mijenja s promjenom ubrzanja g sile teže (koja se mijenja od ekvatora do polova od 9,78 do 9,83 m/s^2).

U svakidašnjem životu označuje »težina« i vaganjem ustanovljenu masu (g, kg, t). (Vidi upozorenje na str. 64!)

Gustoća tehničkih materijala (kg/m^3)

Čisti elementi i spojevi

Gustoća čistih elemenata i spojeva sabrana je u podacima o tvarima:

čisti elementi	str. 80, 81	kiseline, baze	str. 88
hidridi, oksidi	str. 84, 85	soli	str. 90, 91
karbidi, nitridi	str. 86	organski spojevi	str. 94, 95

Tehničke kovine i spojevi

aluminij – lijevani	2560	delta kovina	8600
– kovani	2750	duralumin	2800
aluminijeve slitine	2600 . . . 2900	elektron	1800
bakar – tekući	8220	konstantan	8800
– elektrolitski	8900 . . . 8950	kositar – tekući	7025
– lijevani	8300 . . . 8920	– lijevani	7200
– kovani, valjani	8800 . . . 9000	manganin	8400
bijela kovina	7500 . . . 10100	mjed (mesing)	8400 . . . 8800
bronca – kositrena	8730 . . . 8800	monel kovina	8580
– aluminijska	7400 . . . 8200	olovo – tekuće	10640
cink – tekući	6480	– lijevano	11340
– lijevani	6900	silumin	2500 . . . 2650
– kovani	7000 . . . 7200	sivi lijev	7250
čelik – lijevani	7850	srebro – lijevano	10400 . . . 10500
– valjani	7850	– kovano	10500 . . . 10600
– brzorezni	8100 . . . 9000	zlato, lijevano	19250

Nekovinske krutine

asfalt	1050 . . . 1380	pepeo	1800 . . . 2400
azbest	2100 . . . 2800	pluto	200 . . . 350
azbestna ljepenka	1200	porculan	2150 . . . 2450
boksit	2400 . . . 2600	smirak	4000
celofan	1420	smola, prirodna	1250 . . . 1330
celuloid	1380	staklo	2400 . . . 3000
cement	2200 . . . 3250	svila, umjetna	1250 . . . 1600
grafit	2000 . . . 2500	šamot	1800 . . . 2600
guma, tvrda	1150 . . . 1700	šećer	1610
gumeni proizvodi	1000 . . . 2000	škrob	1530
kaučuk, sirovi	910 . . . 930	tinjac	2600 . . . 3200
keramički proizvodi	1600 . . . 3900	treset, posušen	800 . . . 1600
koks	1600 . . . 1900	troska	2500 . . . 3000
kolofonij	1070 . . . 1090	ugljen	1200 . . . 1500
korund	3750 . . . 4000	ugljen, drveni	1400 . . . 1500
kreda	1800 . . . 2600	ugljeni briketi	1250
kremen (kvarc)	2100 . . . 2650	vapnenac	1500 . . . 1700
kremeno staklo	2200	vapno — živo	900 . . . 1300
kriolit	2950	— gašeno	1150 . . . 1250
led (H_2O)	880 . . . 920	vosak	980 . . . 1040
mast	910 . . . 960	vuna	1300 . . . 1400
pamuk	1480	zemlja	1300 . . . 2000
papir	700 . . . 1200	Zemlja (planet)*	5530

* Ukupna masa Zemlje iznosi 5960 · 10^{18} t.

Kapljevine (pri 15 °C)

benzin — laki	680 . . . 720	plinsko ulje iz	
— teški	< 760	— katrana	880 . . . 900
cilindarsko ulje	930	— kamenog ugljena	1020 . . . 1080
katran iz		— nafte	860 . . . 890
— kamenog ugljena	1100 . . . 1200	— smeđeg ugljena	880 . . . 900
— smeđeg ugljena	850 . . . 910	repičino ulje	911 . . . 918
katransko ulje iz		ricinusovo ulje	959 . . . 974
— kamenog ugljena	1080	solna otopina	
— smeđeg ugljena	780 . . . 1040	(NaCl) — 10%	1071
laneno ulje	940	terpentinsko ulje	860
morska voda	1020 . . . 1030	ulje za loženje	
nafta	700 . . . 1040	— lako	890 . . . 980
parafinsko ulje	900 . . . 1020	— teško	1020 . . . 1080
petrolej	760 . . . 860	voda	999,13

Gradiva

zid od prirodnog kamena:		vapno	1700
granit, porfir	2600	vapno-cement	1900
mramor	2700	beton (od šljunka)	2200
pješčenjak	2400	drvo (prosušeno)	
vapnenac – gust	2600	borovina	600 . . . 700
– porozan	2200	brezovina	700 . . . 800
zid od umjetnog gradiva:		bukovina	700 . . . 800
obična opeka	1800	hrastovina	800 . . . 900
porozna puna opeka	1100	javorovina	650 . . . 750
porozna šuplja opeka	1000	jelovina	550 . . . 600
šuplja opeka	1450	lipovina	500 . . . 600
žbuka:		smrekovina	550 . . . 600
cement	2100	topolovina	450 . . . 500
sadra	1200		

Sipke tvari

briketi, ugljeni	750 . . . 1250	sol	1250
cement – rastresen	1200 . . . 1400	treset	300 . . . 900
– nabijen	1900 . . . 2000	ugljen drveni	
drvo u cjepanicama	330 . . . 520	– od meka drveta	150
koks	320 . . . 450	– od tvrda drveta	200
materijal		ugljen, kameni	800 . . . 900
za nasipavanje:		– smeđi	700 . . . 800
šljunak – suh	1700	vapnenac	1400
– vlažan	2000	vapno, gašeno	1150 . . . 1250
troska (šljaka)	1000	– živo	1060
zemlja, pijesak, ilovača		zemlja	1600 . . . 2000
– mokra	2100	žito, krumpir, voće	
– prirodno vlažna	1800	brašno, rastreseno	500
– suha	1600	ječam	650
pijesak, ljevaonički		krumpir	750
– rastresen	1200	pšenica	760
– nabijen	1650	raž	680
slama	45	voće	360
snijeg – svježe zapao	80 . . . 190	zob	550
–mokar	200 . . . 800		

Kutovi prirodnog pokosa

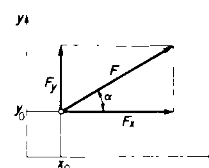
cement	40°	pšenica, raž	25 . . . 35°
grah, grašak	35°	ugljen, kameni	45°
ječam, zob	40 . . . 45°	– smeđi	35 . . . 50°
koks	35 . . . 50°	zemlja	27 . . . 35°

STATIKA

Sila

Sila F (N) je uzrok promjeni gibanja i oblika tijela. Sila je vektor određen veličinom, smjerom i hvatištem.

Sila u ravnini



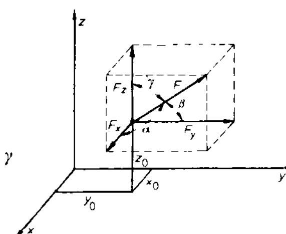
F — sila s hvatištem (x_o, y_o)
F_x, F_y — komponente
α — kut što ga zatvara smjer sile F s osi x

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y$$

$$F_x = F\cos\alpha \qquad F_y = F\sin\alpha$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \qquad \tan\alpha = F_y/F_x$$

Sila u prostoru



F — sila s hvatištem (x_o, y_o, z_o)
F_x, F_y, F_z — komponente
α, β, γ — kutovi što ih zatvara sila F s osima x, y, z

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y + \boldsymbol{F}_z$$

$$F_x = F\cos\alpha \qquad F_y = F\cos\beta \qquad F_z = F\cos\gamma$$

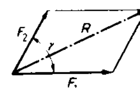
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

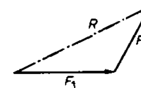
$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$$

Sastavljanje dviju sila u ravnini

Sile koje sastavljamo	F_1, F_2 — komponente
Kut među silama	γ
Ukupna sila	R — rezultanta

Grafičko rješenje:

paralelogram sila 

trokut sila 

Analitičko rješenje:

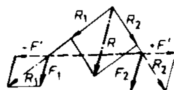
$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\gamma}$$

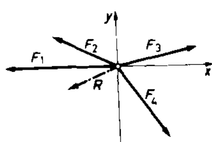
R_x i R_y su projekcije rezultante R na osi x i y

$$R_x = F_1 + F_2\cos\gamma \qquad R_y = F_2\sin\gamma$$

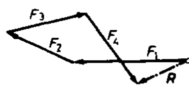
Pri sastavljanju dviju paralelnih sila F_1 i F_2 dodajemo dvije jednake, ali suprotne sile $+F'$ i $-F'$.



Sastavljanje više sila sa zajedničkim hvatištem



Grafičko rješenje: poligon sila

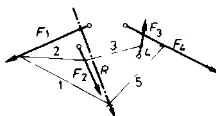


Analitičko rješenje $\quad \boldsymbol{R} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i$

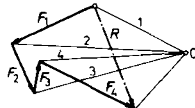
Projekcija rezultante na os $x(y)$ jednaka je zbroju projekcija svih komponenata na os $x(y)$: $\quad R_x = \sum_{i=1}^{n} F_{ix} \quad R_y = \sum_{i=1}^{n} F_{iy} \quad R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$

Hvatište rezultante je u hvatištu sila.

Sastavljanje više sila s različitim hvatištima



Grafičko rješenje: verižni poligon

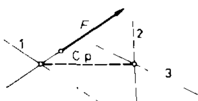


(0 – po volji odabrani pol)

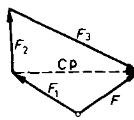
Analitičko rješenje $\quad \boldsymbol{R} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i$

Daljnje rješavanje — pomoću projekcija kao u prijašnjem primjeru.

Rastavljanje sile F u više komponenata (1, 2 *i* 3), *koje se ne sijeku sve u istoj točki*



Grafičko rješenje:



C. p. = Culmannov pravac spaja sjecište pravca djelovanja sile F i jednog od zadanih pravaca sa sjecištem ostalih dvaju pravaca.

Statički moment sile

Statički moment sile M (N m) s obzirom na neku točku (pol 0) je umnožak sile F i njena kraka a (tj. okomite udaljenosti te točke od smjera sile F)

$$M = Fa$$

Po dogovoru moment je pozitivan ako njegovo djelovanje ima smisao suprotan smislu kazaljke na satu.

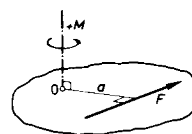
Moment sile je vektor kojemu je smjer okomit na ravninu određenu smjerom sile i kraka. Vektor momenta sile ima takav smisao da je moment, gledan u suprotnom smislu, pozitivan.

Moment sile u ravnini

Momenti komponenata sile F

$$-M_x = F_x y_o$$

$$M_y = F_y x_o$$



Moment sile F

$$M = (-M_x) + M_y = M_y - M_x$$

Zbrajanje momenata s obzirom na istu točku (os)

$$\boldsymbol{M}_R = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{M}_i$$

Moment sile u prostoru

Momenti s obzirom na pojedine koordinatne osi x, y i z (vidi sliku: sile u prostoru – na str. 101):

$$M_x = F_z y_o - F_y z_o \qquad M_y = F_x z_o - F_z x_o \qquad M_z = F_y x_o - F_x y_o$$

ukupni moment

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$$

Spreg sila (par sila) su dvije jednako velike, usporedne i suprotno usmjerene sile F i $-F$ s međusobnim razmakom a. Te se dvije sile ne mogu sastaviti u rezultantu. Moment sprega sila iznosi



$$M = Fa$$

Spreg sila može se u istoj ili paralelnoj ravnini po volji premještati ili zamijeniti drugim spregom sila koji ima isti moment.

Ravnoteža sila

Sile su u ravnoteži ako kruto tijelo, na kojeg djeluju, ostaje u mirovanju (odn. ne mijenja stanje gibanja).

Uvjeti ravnoteže

a) Rezultanta svih sila mora biti jednaka nuli

$$R = \sum_{i=1}^{n} F_i = 0$$

Stoga moraju biti i rezultante komponenata jednake nuli

$$R_x = \sum_{i=1}^{n} F_{ix} = 0 \qquad R_y = \sum_{i=1}^{n} F_{iy} = 0 \qquad R_z = \sum_{i=1}^{n} F_{iz} = 0$$

Pri grafičkom rješavanju poligon sila mora biti zatvoren ($R = 0$).

b) Zbroj svih momenata mora biti jednak nuli

$$M_R = \sum_{i=1}^{n} M_i = 0$$

Zato moraju zbrojevi momenata s obzirom na pojedine koordinatne osi također biti jednaki nuli

$$M_{Rx} = \sum_{i=1}^{n} M_{ix} = 0 \qquad M_{Ry} = \sum_{i=1}^{n} M_{iy} = 0 \qquad M_{Rz} = \sum_{i=1}^{n} M_{iz} = 0$$

U sila koje imaju isto hvatište nije potreban uvjet za momente.

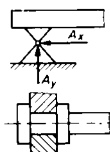
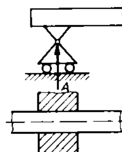
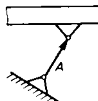
Stabilnost

Tijelo je stabilno s obzirom na prevrtanje ako je

$\sum$ momenata stabilnosti $> \sum$ momenata prevrtanja

Pri tome računamo sve momente s obzirom na brid prevrtanja.

Reakcije u osloncima (smjer)

Nepomični oslonac	Pomični oslonac	Njihajni oslonac
		

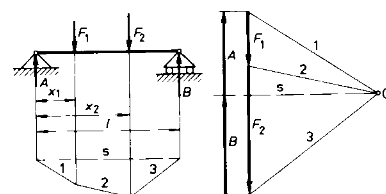
Nosači

Nosač na dva oslonca

Reakcije u osloncima

$$A = F_1 \frac{l - x_1}{l} + F_2 \frac{l - x_2}{l}$$

$$B = F_1 \frac{x_1}{l} + F_2 \frac{x_2}{l}$$



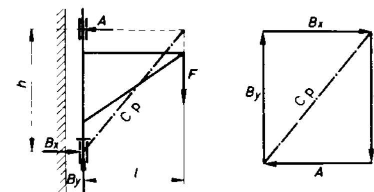
Zidni (okretni) nosač

Reakcije u osloncima

$$A_x = B_x = F \frac{l}{h}$$

$$A_y = F$$

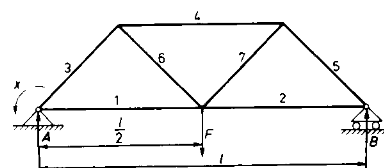
(C. p. = Culmannov pravac)



Rešetkasti nosač (rešetka)

Reakcije u osloncima

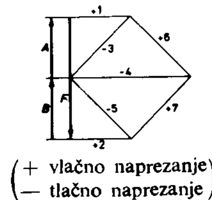
$$A = B = \frac{F}{2}$$



Cremonin plan

sastavljen je od (zatvorenih) poligona sila koje djeluju u svakom čvoru, a nalaze se u ravnoteži.

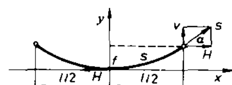
Najprije određujemo reakcije u osloncima A i B. Zatim crtamo plan tako da kod svih čvorova uzimamo u obzir redoslijed sila kakav je na slici, pri čemu treba usvojiti isti smisao promatranja (npr. x).



(+ vlačno naprezanje
— tlačno naprezanje)

Statika užeta

Uže upeto na razmaku l s progibom f. Težina jedinice duljine



$$p = A\varrho g \quad (\text{N/m})$$

A — (ukupni) presjek užeta
ϱ — gustoća materijala užeta
g — ubrzanje teže ($= 9{,}81\ \text{m/s}^2$).

1. **Maleni progib**

Uže će poprimiti (dovoljnom točnošću) oblik parabole

$$y \approx 4f/l^2 \cdot x^2$$

Duljina užeta	$2s \approx l$	Težina užeta	$G \approx pl$
Progib	$f \approx pl^2/8H$	Prikloni kut	$\tan\alpha \approx 4f/l$
Sile u užetu: komponente	$V \approx pl/2$	$H \approx pl^2/8f$	
rezultanta	$S \approx pl/8 \cdot \sqrt{(l/f)^2 + 16}$		

2. **Proizvoljni progib**

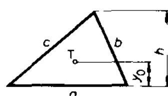
Uže će poprimiti oblik lančanice

$$y = h/2 \cdot (e^{x/h} + e^{-x/h}) - h \qquad h = H/p \approx l^2/8f$$

Duljina užeta	$2s = 2\sqrt{f^2 + 2fh}$	Težina užeta	$G = 2ps$
Progib	$f = h/2 \cdot (e^{l/2h} + e^{-l/2h}) - h$	Prikloni kut	$\tan\alpha = s/h$
Sile u užetu: komponente	$V = ps$	$H = ph$	
rezultanta	$S = p(f + h)$		

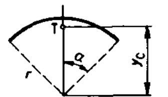
TEŽIŠTA

Težišta linija



1. Dužina. Težište je na polovici dužine.
2. Obod trokuta

$$y_o = \frac{h}{2} \cdot \frac{b + c}{a + b + c}$$

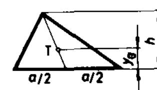


3. Kružni luk s polumjerom r i kutom α

$$y_o = r\frac{\sin\alpha}{\hat{\alpha}} \qquad \hat{\alpha}\,(\text{rad})$$

$\alpha = \pi/2 = 90^\circ \qquad y_o = 2r/\pi \approx 0{,}6366\,r$
$\alpha = \pi/4 = 45^\circ \qquad y_o = 2r/\pi \cdot \sqrt{2} \approx 0{,}9003\,r$
$\alpha = \pi/6 = 30^\circ \qquad y_o = 3r/\pi \approx 0{,}9549\,r$

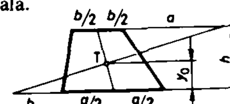
Težišta likova



1. Trokut

$$y_o = \frac{h}{3}$$

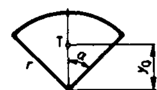
2. Paralelogram. Težište je u sjecištu dijagonala.



3. Trapez

$$y_o = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2b}{a + b}$$

4. Pravilni višekut i krug. Težište je u središtu.
5. Kružni isječak



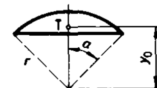
$$y_o = \frac{2}{3}r\frac{\sin\alpha}{\hat{\alpha}} \qquad \hat{\alpha}\,(\text{rad})$$

$\alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \qquad y_o = \frac{4r}{3\pi} \approx 0{,}4244\,r$

$\alpha = \frac{\pi}{4} = 45^\circ \qquad y_o = \frac{4\sqrt{2}}{3\pi}r \approx 0{,}6002\,r$

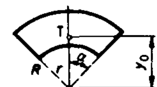
$\alpha = \frac{\pi}{6} = 30^\circ \qquad y_o = \frac{2r}{\pi} \approx 0{,}6366\,r$

6. Kružni odsječak



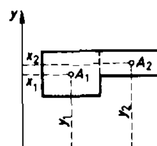
$$y_o = \frac{2}{3}r\frac{\sin^3\alpha}{\hat{\alpha} - \sin\alpha\cos\alpha} \qquad \hat{\alpha}\,(\text{rad})$$

7. Isječak kružnog vijenca



$$y_o = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\sin\alpha}{\hat{\alpha}} \qquad \hat{\alpha}\,(\text{rad})$$

8. Sastavljeni lik
Pojedine površine A_i
koordinate težišta

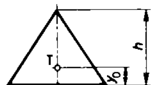


$$x_0 = \sum_{i=1}^{n}(A_i x_i)/A \qquad A = \sum_{i=1}^{n} A_i$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^{n}(A_i y_i)/A$$

Težišta tijela

1. Kocka i prizma. Težište je u središtu.



2. Piramida i stožac

$$y_0 = \frac{h}{4}$$

3. Kugla. Težište je u središtu.

4. Polukugla

$$y_0 = \frac{3}{8} r$$

5. Kuglin odsječak (kalota)

$$y_0 = \frac{3}{4} \cdot \frac{(2r - h)^2}{(3r - h)}$$

6. Kuglin isječak

$$y_0 = \frac{3}{8} (2r - h)$$

7. Kuglina zona

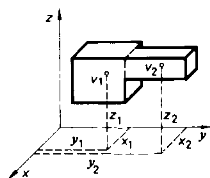
$$y_0 = \frac{-3(a^4 - b^4)}{6h(a^2 + b^2) + 2h^3}$$

$$a = \sqrt{h_a(2r - h_a)} \qquad b = \sqrt{h_b(2r - h_b)}$$

8. Sastavljeno tijelo

Pojedini volumeni V_i

koordinate težišta



$$x_0 = \sum_{i=1}^{n} (V_i x_i)/V$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^{n} (V_i y_i)/V \qquad V = \sum_{i=1}^{n} V_i$$

$$z_0 = \sum_{i=1}^{n} (V_i z_i)/V$$

TRENJE

Trenje je otpor pri klizanju dvaju tijela koja se dodiruju plohama. Sila trenja F_t ovisi o hrapavosti i materijalu kliznih ploha, sredstvu za podmazivanje i o okomitoj (normalnoj) sili F_n, kojom jedna ploha tlači drugu.

1. Trenje mirovanja

Sila trenja $F_t = \mu_0 F_n$ — μ_0 — koeficijent trenja mirovanja

2. Trenje gibanja

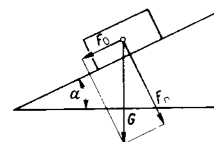
Sila trenja $F_t = \mu F_n$ — μ — koeficijent trenja gibanja

3. Koeficijenti trenja

Parovi materijala	μ_0		μ	
	suho	podmazano	suho	podmazano
čelik na čelik	0,12 ... 0,30	0,10	0,10	0,01 ... 0,05
čelik na lijev. željezo ili broncu	0,19 ... 0,20	0,10	0,18	0,01 ... 0,05
kovina na drvo	0,50 ... 0,65	0,10	0,20 ... 0,50	0,02 ... 0,10
drvo na drvo	0,40 ... 0,65	0,16 ... 0,20	0,20 ... 0,40	0,04 ... 0,16
koža na kovinu	0,60	0,20	0,22	0,12
koža na lijevano željezo	0,56	—	0,28	0,12

Koeficijent trenja μ za gumeni kotač na dobroj cesti (asfalt, beton): suho: 0,5 ... 0,65; vlažno: 0,2 ... 0,35; snijeg: 0,1 ... 0,5; led: 0,05 ... 0,15

4. Trenje tijela na kosini



Sila okomita na podlogu

$F_n = G \cos\alpha$ — G — težina

Sila u smjeru podloge (niz kosinu)

$F_0 = G \sin\alpha$

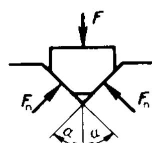
Tijelo miruje — zbog trenja — u svakom položaju kosine ako je

$F_t \geqq F_0 \quad \mu_0 \geqq \tan\alpha \quad \varrho_0 \geqq \alpha \qquad F_t = \mu_0 F_n = \mu_0 G \cos\alpha$

Kut trenja $\tan\varrho_0 = \mu_0$ — ϱ_0 — kut trenja mirovanja

$\tan\varrho = \mu$ — ϱ — kut trenja gibanja

5. Trenje u klinastom utoru pri djelovanju sile F na klin



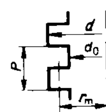
$$F = 2\,F_n \sin\alpha$$

Trenje mirovanja

$$F_t = \mu_0 2\,F_n = \frac{\mu_0}{\sin\alpha}\,F = \mu_0' F$$

Koeficijent trenja klina $\mu_0' = \mu_0/\sin\alpha$

6. Trenje vijka



a) Vijak s plosnatim navojem

Srednji polumjer $r_m = \dfrac{d + d_0}{4}$

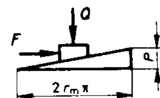
Kut uspona α $\tan\alpha = \dfrac{P}{2r_m\pi}$

Koeficijent trenja $\tan\varrho = \mu$

Djelovanje vijka nasuprot sili opterećenja Q:

Sila gibanja bez trenja

$$F_0 = Q\tan\alpha$$



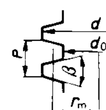
Sila gibanja s trenjem

$$F = Q\tan(\alpha + \varrho) = Q\,\frac{P + 2r_m\pi\mu}{2r_m\pi - \mu P}$$

Korisnost $\eta = F_0/F = \tan\alpha/\tan(\alpha + \varrho)$

Sila samokočnosti $F' = Q\tan(\alpha - \varrho_0)$

Uvjet samokočnosti vijka $\alpha \leqq \varrho_0$.



b) Vijak s trapeznim navojem

Koeficijent trenja $\mu' = \mu/\cos(\beta/2)$

Sav ostali proračun trenja isti je kao i za vijak s plosnim navojem.

7. Trenje u kliznom ležaju u kojem djeluje sila F na površinu A

Specifični pritisak $p = F/A$

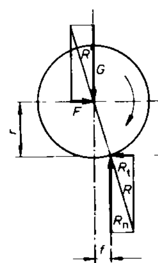
Moment trenja: za radijalni ležaj promjera d (polumjera r) i duljine l

$$M = \mu r F \qquad p = F/l d$$

za aksijalni ležaj s polumjerom rukavca r i polumjerom otvora u ležaju r_0

$$M = 2/3 \cdot \mu p \pi (r^3 - r_0^3) \qquad p = F/\pi(r^2 - r_0^2)$$

8. Trenje kotrljanja



Kotač (kolut, kugla, valjak), opterećen silom (npr. težinom G), kotrlja se po ravnoj podlozi zbog sile kotrljanja F koja na nj djeluje odnosno zbog momenta kotrljanja M.

Hvatište (prema središtu kola uperene) sile otpora R pomaknuto je za krak f pred kotačem.

Komponete sile otpora R: $R_n = G$ $R_t = F$

Trenje kotrljanja: $f/r = R_t/R_n = F/G$

Sila kotrljanja i moment: $F = f/r \cdot G$ $M = fG$

Kotrljanje počinje sâmo pri nagibu podloge $\tan\alpha > f/r$.

Pri kotrljanju zbog momenta kotrljanja M mora biti koeficijent trenja između kotača i podloge (tračnice, ceste) $\mu > f/r$.

Krak momenta kotrljanja f:

kaljena čelična tijela (kugle, valjci) na čeličnoj podlozi (kotrljajući ležaji) $f \approx 0{,}01$ mm

čelik, čelični lijev ili sivi lijev na čeliku (vozila na tračnicama) $f \approx 0{,}5$ mm

drvo na drvetu $f \approx 5{,}0$ mm

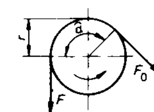
Trenje kotrljanja f/r za gumene kotače na cesti (automobili): asfalt $\approx 0{,}01$; beton $\approx 0{,}015$; makadam $\approx 0{,}03$; pijesak do 0,3.

9. Kolutno obodno trenje

Trenje užeta ili trake na obodu koluta

Obuhvatni kut $\hat{\alpha}$ (rad) $= 180/\pi \cdot \alpha°$

a) Trenje na užnici $F > F_0$



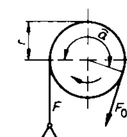
Najveća obodna tarna sila

$$F_{t\,max} = F - F_0 = F(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)/e^{\mu\hat{\alpha}}$$

Najveći obodni tarni moment

$$M_{t\,max} = F_{t\,max} r = Fr(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)/e^{\mu\hat{\alpha}}$$

b) Trenje na zavornom kolutu $F > F_0$



Tarna sila

$$F_t = F - F_0 = F_0(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$$

Tarni moment

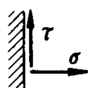
$$M_t = F_t r = F_0 r(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$$

ČVRSTOĆA

Naprezanja

Pri deformacijama nastaju u materijalu naprezanja koja djeluju suprotno uzroku deformacija:

– normalne sile F_n djeluju okomito na promatrani presjek S, i uzrokuju *normalna naprezanja* σ



$$\sigma = F_n/S$$

– tangencijalne sile F_t djeluju u presjeku S samom i uzrokuju *tangencijalna naprezanja* τ

$$\tau = F_t/S$$

a) Normalna naprezanja σ uzrokuju produljenje ili skraćenje materijala (npr. kod vlaka ili tlaka). Pri tom se pojavljuje

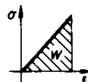
aps. produljenje $\Delta l = l - l_0$ rel. produljenje $\varepsilon = \Delta l/l_0$
aps. suženje $\Delta d = d_0 - d$ rel. suženje $\varepsilon_q = \Delta d/d_0$

l_0, d_0 — prvobitna duljina odnosno promjer epruvete (bez naprezanja),
l, d — duljina i promjer epruvete pri naprezanju σ.

$\varepsilon/\varepsilon_q = m$ Poissonov broj $\mu = 1/m$
za kovine $m = 3 \ldots 4$ (za čelik: 10/3)
za sivi lijev $m = 5 \ldots 9$

Hookeov zakon vrijedi ako je rastezanje linearno proporcionalno naprezanju

$\varepsilon = \alpha\sigma$ α — koeficijent rastezanja
$\sigma = \varepsilon E$ $E = 1/\alpha$ — modul elastičnosti



Hookeov zakon vrijedi (do granice linearne proporcionalnosti) za čelik, a praktično i za bakar aluminij i drvo.

Deformacijski rad $W = \sigma\varepsilon/2$.

Potencijalni zakon (ustanovljen na temelju preciznih mjerenja) $\varepsilon = \alpha_0 \sigma^n$ vrijedi osobito za sivi lijev, gdje je $\alpha_0 \approx 1/E$, dok je $n = 1{,}08$ za vlak a $n = 1{,}04$ za tlak. Za neke druge materijale je npr.

$n > 1$ — za lijevani cink, granit, beton ($n = 1{,}14 \ldots 1{,}16$)
$n < 1$ — za kožu ($n = 0{,}7$), užad od konoplje itd.

Modul elastičnosti E (N/mm²)

čelik	210000	Al i Al-slitine	≈ 70000
čelični lijev	200000	Mg i Mg-slitine	≈ 39000
nodularni lijev	≈ 180000	bakar	125000
sivi lijev	≈ 100000	mjed	≈ 90000
karbidni tvrdi metali	≈ 580000	drvo	≈ 10000

b) Tangencijalna naprezanja τ uzrok su klizanju materijala (npr. kod smicanja). Pri tom se javlja tangencijalna deformacija γ. Slično Hookeovu zakonu vrijedi za područje u kojem je tangencijalno naprezanje τ linearno proporcionalno klizanje (deformaciji γ)

$\gamma = \beta\tau$ β – koeficijent smicanja
$\tau = \gamma G$ $G = 1/\beta$ – modul smicanja

Deformacijski rad $W = \tau\gamma/2$.

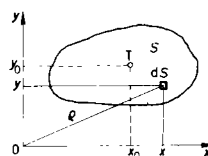
Odnos između modula elastičnosti E i modula smicanja G

$$G = Em/2(m + 1) = E/2(1 + \mu)$$

(Za čelik je $m = 10/3$ pa je $G = 0{,}385\ E$.)

Geometrijske karakteristike presjeka

Statički moment plohe s obzirom na neku os jest suma umnožaka elementarnih površina te plohe i udaljenosti njihovih težišta od izabrane osi



$$M_x = \int y\,dS \approx \sum y_i S_i$$

a jednak je umnošku površine S i udaljenosti y_0 njena težišta T od osi x

$$M_x = y_0 S$$

Statički moment plohe s obzirom na os kroz težište je nula.

Moment tromosti plohe

Aksijalni moment plohe je suma umnožaka elementarnih površina i kvadrata udaljenosti njihovih težišta od izabrane osi, npr. od osi x ili y:

$$I_x = \int y^2\,dS \approx \sum y_i^2 S_i \qquad I_y = \int x^2\,dS \approx \sum x_i^2 S_i$$

Polumjer tromosti $i = \sqrt{I/S}$

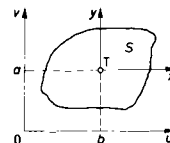
Polarni moment tromosti plohe je suma umnožaka elementarnih površina i kvadrata udaljenosti njihovih težišta od izabranog pola (0)

$$I_p = \int \varrho^2\,dS \approx \sum \varrho_i^2 S_i$$

Pri tom vrijedi $\varrho^2 = x^2 + y^2$ i $I_p = I_x + I_y$

Moment tromosti plohe uvijek je pozitivan.

Steinerovo pravilo



Aksijalni moment tromosti plohe s obzirom na os koja je paralelna s osi kroz težište iznosi

$$I_u = I_x + a^2 S \qquad I_v = I_y + b^2 S$$

Vlak i tlak

Opterećenje F, koje zamišljamo da je jednoliko raspodijeljeno po presjeku S, uzrokuje naprezanje

kod vlaka $+\sigma = \frac{F}{S}$

kod tlaka $-\sigma = -\frac{F}{S}$

Deformacija kod vlaka (tlaka) – produljenje (skraćenje)

$$\Delta l = \sigma l/E$$

Temperaturna naprezanja σ_T pojavljuju se pri zagrijavnju ili ohlađivanju čvrsto upeta predmeta

$$\sigma_T = \varepsilon E = E \cdot \Delta l/l_0$$

Δl je linearno temperaturno produljenje (skraćenje) (v. str. 157)

$$\Delta l = \alpha_T \, l_0 \cdot \Delta T$$

gdje su: l_0 – prvobitna duljina, ΔT – temperaturna razlika, α_T – linearni koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}) (v. str. 158 i 159).

$$\sigma_T = E\alpha_T \cdot \Delta T$$

Temperaturna naprezanja ne zavise od dimenzija predmeta i mogu biti katkada vrlo velika.

Savijanje

Moment savijanja M uzrokuje naprezanje σ, koje zamišljamo raspodijeljeno po presjeku razmjerno prema udaljenosti od neutralne osi n.

Neutralna os prolazi kroz težište promatranog presjeka (na sl.: kroz točku 0).

Maksimalno naprezanje na savijanje σ_{maks} pojavljuje se u točki koja je najudaljenija od neutralne osi (za e_1, e_2), i iznosi

$$+\sigma_{max} = Me_1/I \qquad -\sigma_{max} = Me_2/I$$

Ako je presjek simetričan s obzirom na n ($e_1 = e_2 = e$), vrijedi

$$\sigma_{max} = Me/I = M/W$$

I – moment tromosti presjeka S s obzirom na n

W – *moment otpora* presjeka $W = I/e$

Progib nosača f slijedi iz diferencijalne jednadžbe elastične linije

$$y'' = -M/EI$$

M_{max}, f, I, W za najčešće slučajeve dani su na str. 115 i 116.

Momenti i progibi nosača

Slika opterećenja	Moment savijanja M_{max}	Opasni presjek	Progib f	na mjestu
	Fl	B	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3}$	A ($x = 0$)
	$\frac{Fl}{4}$	C	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{48}$	C ($x = l/2$)
	$\frac{Fab}{l}$	C	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{a^2b^2}{3l} \cdot \frac{l+b}{3b}\sqrt{\frac{l+b}{3a}}$	$x = a\sqrt{\frac{l+b}{3a}}$ za $a > b$
	$\frac{3Fl}{16}$	B	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{48\sqrt{5}}$	$x = \frac{l}{\sqrt{5}}$
	$\frac{Fl}{8}$	A B C	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{192}$	C ($x = l/2$)
	$\frac{Ql}{2}$	B	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{l^3}{8}$	A ($x = 0$)
	$\frac{Ql}{8}$	C	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{5l^3}{384}$	C ($x = l/2$)
	$(-)\frac{Ql}{8}$	B	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{l^3}{185}$	$x = 0{,}4215\,l$
	$(-)\frac{Ql}{12}$	A B	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{l^3}{384}$	C ($x = l/2$)

Momenti tromosti I_x i momenti otpora W_x

Presjek	I_x	W_x
	$\frac{a h^3}{12}$	$\frac{a h^2}{6}$
	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a^3}{6}$
$e = 2h/3$	$\frac{b h^3}{36}$	$\frac{b h^2}{24}$
	$\frac{5}{16}\sqrt{3}\cdot r^4 = 0{,}5413\, r^4$	$\frac{5}{8} r^3$
	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32} \approx 0{,}1\, d^3$
$e = \frac{(3-4/\pi)d}{6} = 0{,}288\, d$	$\left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi}\right)/16 \cdot d^4 = 0{,}00686\, d^4$	$0{,}0238\, d^3$
	$\frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$	$\frac{\pi}{32}\cdot\frac{D^4 - d^4}{D} \approx 0{,}1\,\frac{D^4 - d^4}{D}$
Za tanke stijenke $s = (D - d)/2$ $r = (D + d)/2$	$\approx \pi s r^3$	$\approx \pi s r^2$
	$\frac{\pi a b^3}{4}$	$\frac{\pi a b^2}{4}$

Momente tromosti i momente otpora za standardne čelične profile vidi u poglavlju: Oblici kovinskih poluproizvoda (str. 426 do 430).

Smik (Odrez)

Poprečna sila F, koja djeluje u samom presjeku, a zamišljamo je jednoliko raspodijeljenom po presjeku S, uzrokuje naprezanja na smik

$$\tau_s = F/S$$

Naprezanja na smik uvijek su vezana s naprezanjem na savijanje.

U kratkih svornjaka i zakovica možemo naprezanje na savijanje zanemariti i izvršiti proračun samo na smik.

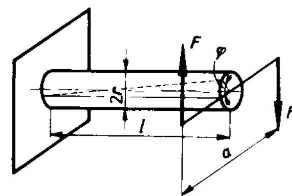
Međutim, čim se smicanju pridruži i moment savijanja, naprezanja na smik se raspodijele po presjeku nejednoliko. Zbog toga se pojavljuje najveće naprezanje na smik:

kod pravokutnog presjeka	$\tau_{s\,max} = (3/2)\cdot F/S$
kod okruglog presjeka	$\tau_{s\,max} = (4/3)\cdot F/S$
kod okruglog prstena s tankom stijenkom	$\tau_{s\,max} \approx 2F/S$

Torzija (Uvijanje)

Moment torzije T

$$T = Fa$$



uzrokuje torziono naprezanje koje zamišljamo jednoliko razdijeljeno po presjeku i razmjerno prema udaljenosti od težišta. Najveće torziono naprezanje pojavljuje se u točki najudaljenijoj od težišta (r)

$$\tau_{t\,max} = (T/I_p)r = T/W_p$$

I_p – polarni moment tromosti presjeka
W_p – polarni moment otpora presjeka

$$W_p = I_p/r$$

Za kružni presjek je npr. $I_p = \pi d^4/32 \approx 0{,}1\, d^4$ $W_p = \pi d^3/16 \approx 0{,}2\, d^3$

Kut torzije φ

$$\varphi = Tl/GI_p \qquad \varphi(\text{rad})$$

Kut torzije sveden na jedinicu duljine

$$\vartheta = T/GI_p \qquad \vartheta(\text{rad/m})$$

Polarni momenti otpora W_p i kutovi torzije svedeni na jedinicu duljine sabrani su za najvažnije presjeke na str. 118.

Polarni momenti otpora i kutovi torzije

Presjek	Polarni moment otpora W_p	Kut torzije na jedinicu duljine $\hat{\vartheta}$ (rad/m)
	$\frac{\pi}{16} \cdot d^3$	$\frac{32}{\pi d^4} \cdot \frac{T}{G}$
	$\frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$	$\frac{32}{\pi(D^4 - d^4)} \cdot \frac{T}{G}$
Za tanke stijenke $s = (D - d)/2$ $r = (D + d)/2$	$\approx 2\pi s r^2$	$\approx \frac{1}{2\pi s r^3} \cdot \frac{T}{G}$
	$\frac{\pi}{2} \cdot a b^2$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{a^2 + b^2}{a^3 b^3} \cdot \frac{T}{G}$
	$0{,}208\, a^3$	$\frac{7{,}11}{a^4} \cdot \frac{T}{G}$
	$\frac{c_1}{c_2} \cdot a b^2$	$\frac{1}{c_1 a b^3} \cdot \frac{T}{G}$

$$c_1 = \frac{1}{3}\left(1 - \frac{0{,}630}{n} + \frac{0{,}052}{n^5}\right)$$

$$c_2 = 1 - \frac{0{,}65}{1 + n^3}$$

$$n = \frac{a}{b}$$

Opterećenje i progib opruga

σ – normalno naprezanje F – opterećenje
τ – tangencijalno naprezanje f – progib

$$F = \frac{b h^2}{6} \cdot \frac{\sigma}{l}$$

$$f = \frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3} = \frac{4 l^3}{b h^3} \cdot \frac{F}{E} = \frac{2 l^2}{3h} \cdot \frac{\sigma}{E}$$

$$F = \frac{n b h^2}{6 l}\, \sigma$$

$$f = \psi\, \frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3} = \psi \frac{4 l^3}{n b h^3} \cdot \frac{F}{E} = \psi \cdot \frac{2 l^2}{3h} \cdot \frac{\sigma}{E}$$

n – broj lamela

n	1	2	3	4	5	10	∞
ψ	1,000	1,160	1,234	1,283	1,315	1,390	1,500

$$F = \frac{b h^2}{6\, r}\, \sigma$$

$$f = r\hat{\varphi} = \frac{F}{EI} \cdot l r^2 =$$

$$= 12 \frac{F}{E} \cdot \frac{l r^2}{b h^3} = 2\, \frac{l r}{h} \cdot \frac{\sigma}{E}$$

$\hat{\varphi}$ (rad)

$$F \approx \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d^3}{r} \cdot \tau$$

$$f \approx \frac{64 n r^3}{d^4} \cdot \frac{F}{G} = \frac{32 l r^2}{\pi d^4} \cdot \frac{F}{G} =$$

$$= \frac{4 \pi n r^2}{d} \cdot \frac{\tau}{G} = \frac{2 l r}{d} \cdot \frac{\tau}{G}$$

n – broj zavoja opruge
l – duljina žice opruge

(Te jednadžbe vrijede samo ako je promjer žice vrlo malen prema promjeru opruge!)

Izvijanje

Najmanja sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje je sila izvijanja F_k. Djelovanje te sile na nosač presjeka S uzrokuje u njemu naprezanje izvijanja σ_k

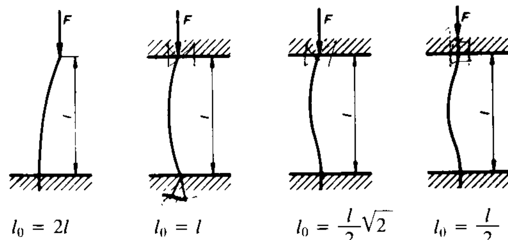
$$\sigma_k = \frac{F_k}{S}$$

Sila izvijanja F_k i naprezanje izvijanja σ_k ovise o vitkosti λ

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

gdje znače: l_0 – slobodnu duljinu izvijanja, i – polumjer tromosti

Slobodna duljina izvijanja l_0 za različite slučajeve opterećenja na izvijanje iznosi:



$l_0 = 2l$ $\quad l_0 = l$ $\quad l_0 = \frac{l}{2}\sqrt{2}$ $\quad l_0 = \frac{l}{2}$

Polumjer tromosti i

$$i = \sqrt{I_{min}/S}$$

gdje je S presjek nosača, a I_{min} njegov najmanji aksijalni moment tromosti.

Eulerova jednadžba za elastično izvijanje

$$F_k = \pi^2 \frac{EI_{min}}{l_0^2}$$

Odatle slijedi naprezanje σ_k za elastično izvijanje

$$\sigma_k = \frac{F_k}{S} = \pi^2 \frac{EI_{min}}{l_0^2\,S} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2}$$

Te dvije jednadžbe vrijede samo za elastično tlačno područje, tj. kod čelika za vitkost $\lambda > 105$.

Stvarnu silu F kojom možemo opteretiti nosač određujemo pomoću faktora sigurnosti v

$$F = \frac{F_k}{v}$$

Faktor sigurnosti v iznosi: za sivi lijev $v = 8$, za čelik $v = 5$, za drvo $v = 6 \ldots 12$.

Tetmajerove jednadžbe za naprezanje σ_k pri neelastičnom izvijanju kojima se služimo pri gradnji strojeva:

Materijal	E N/mm²	σ_k N/mm²	Vitkost λ
sivi lijev	100000	$776 - 12{,}0\,\lambda + 0{,}053\,\lambda^2$	$\lambda < 80$
čelični lijev	200000	$303 - 1{,}29\,\lambda$	$\lambda < 112$
čelik:			
– mekan	210000	$310 - 1{,}14\,\lambda$	$\lambda < 105$
– tvrd	210000	$335 - 0{,}62\,\lambda$	$\lambda < 89$
– Cr Ni	210000	$470 - 2{,}30\,\lambda$	$\lambda < 86$
drvo	10000	$29{,}3 - 0{,}194\,\lambda$	$\lambda < 100$

Dopušteno opterećenje

$$F = \frac{F_k}{v} = \frac{\sigma_k S}{v}$$

Faktor sigurnosti v iznosi: za manje strojeve $v = 8 \ldots 10$,
za veće strojeve $v = 6 \ldots 8$.

*

»Postupak ω« upotrebljavamo za čelične i drvene konstrukcije. Naprezanje u nosaču određujemo izrazom

$$\frac{F}{S}\,\omega = \sigma$$

gdje su: S – presjek nosača, F – tlačna sila kojom je opterećen, σ – naprezanje (normalno), ω – koeficijent izvijanja ovisan o vitkosti λ i materijalu nosača.

Koeficijenti izvijanja ω

za čelik čvrstoće 360 N/mm² (ω_{360}) i 510 N/mm² (ω_{510}):

λ	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω_{360}	1,00	1,04	1,08	1,14	1,21	1,30	1,41	1,55	1,71	1,90
ω_{510}	1,00	1,06	1,11	1,19	1,28	1,41	1,58	1,79	2,05	2,53
λ	110	120	130	140	160	180	200	220	240	250
ω_{360}	2,11	2,43	2,85	3,31	4,32	5,47	6,75	8,17	9,73	10,55
ω_{510}	3,06	3,65	4,28	4,96	6,48	8,21	10,13	12,26	14,59	15,83

za sivi lijev

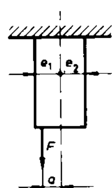
λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω	1,00	1,01	1,05	1,11	1,22	1,39	1,67	2,21	3,50	4,43	5,45

za drvo

λ	0	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
ω	1,00	1,01	1,03	1,08	1,14	1,42	2,07	3,22	4,64	6,31	7,25

Složena opterećenja

a) Vlak i savijanje



Nosač opterećen na vlak silom F koja djeluje na nj ekscentrično na udaljenosti a od osi nosača dodatno je opterećen momentom $M = Fa$.

Naprezanje zbog vlaka $\sigma = F/S$

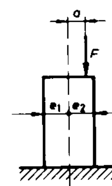
Najveće naprezanje zbog savijanja

$$+\sigma_1 = Me_1/I = Fae_1/I$$
$$-\sigma_2 = -Me_2/I = -Fae_2/I$$

Najveća ukupna naprezanja $\sigma_{r1} = \sigma + \sigma_1 = F/S + Fae_1/I$

$$\sigma_{r2} = \sigma - \sigma_2 = F/S - Fae_2/I$$

b) Tlak i savijanje



Tlačna sila F koja djeluje na nosač u udaljenosti a od osi nosača uzrokuje opterećenje na tlak i dodatno opterećenje momentom $M = Fa$.

Naprezanja zbog tlaka $-\sigma = -F/S$

Naprezanje zbog savijanja

$$+\sigma_1 = Me_1/I = Fae_1/I$$
$$-\sigma_2 = -Me_2/I = -Fae_2/I$$

Najveća ukupna naprezanja

$$\sigma_{r1} = -\sigma + \sigma_1 = -F/S + Fae_1/I$$
$$\sigma_{r2} = -\sigma - \sigma_2 = -F/S - Fae_2/I$$

Nosače koji su razmjerno vitki (velike duljine s obzirom na presjek) treba proračunati i na izvijanje.

*

Što se hvatište sile F više udaljuje od osi nosača, dakle što se udaljenost a povećava, to se više smanjuju tlačna naprezanja u rubu nosača koji je nasuprot hvatištu sile F. Ta tlačna naprezanja poprimaju konačnu vrijednost jednaku nuli kad a naraste do vrijednosti $a = I/Se_1$. Poveća li se udaljenost a iznad te vrijednosti, u suprotnom rubu nosača pojavit će se vlačna naprezanja. Sama tlačna naprezanja (npr. kod materijala koji ne podnose vlačna naprezanja) dobivamo ako sila djeluje na površini jezgre presjeka koja je omeđena »polumjerom jezgre r«

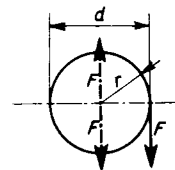
$$r = I/Se_1$$

Polumjer jezgre r iznosi za različite nosače:

za kvadratni (sa stranicom h) – u smjeru stranice	$r = h/6$
– u smjeru dijagonale	$r = 0{,}1179\,h$
za okrugli (s promjerom d)	$r = d/8$
za prstenasti (s promjerima d i D)	$r = D/8 \cdot [1 + (d/D)^2]$

c) Smik i torzija

Silu F koja djeluje na obodu čepa promjera d možemo zamijeniti silom koja djeluje u središtu čepa i momentom para sila $T = Fr = Fd/2$.



Sila kroz središte uzrokuje naprezanje na smik τ_s

$$\tau_s = (4/3) \cdot F/S = (16/3) \cdot F/\pi d^2$$

Okretni moment dviju sila uzrokuje tangencijalno naprezanje τ_t

$$\tau_t = 16\,T/\pi d^3 = 8\,F/\pi d^2$$

Najveće ukupno naprezanje iznosi

$$\tau_{max} = \tau_s + \tau_t = (16/3) \cdot F/\pi d^2 + 8\,F/\pi d^2 = 40\,F/3\pi d^2$$

d) Savijanje i torzija

Presjek nosača je opterećen istovremeno momentom savijanja M i okretnim momentom T.

U okruglog presjeka (ili kružnog vijenca) pojavljuju se najveće vrijednosti normalnog naprezanja σ i tangencijalnog naprezanja τ na rubu na istom mjestu.

Okrugli presjek ima

moment otpora $W = \pi d^3/32$

polarni moment otpora $W_p = \pi d^3/16 = 2\,W$

Kružni vijenac ima

moment otpora $W = (\pi/32) \cdot (D^4 - d^4)/D$

polarni moment otpora $W_p = (\pi/16) \cdot (D^4 - d^4)/D = 2\,W$

Pojedinačna naprezanja iznose

normalna naprezanja zbog savijanja $\sigma = M/W$

tangencijalna naprezanja zbog torzije $\tau = T/W_p = T/2\,W$

Ukupna su naprezanja

$$\sigma_{max} = \xi\, M/W$$

gdje vrijedi

— po Bachu	$\xi = 0{,}35 + 0{,}65\sqrt{1 + (\alpha_0 T/M)^2}$	$\alpha_0 = \sigma_{dop}/1{,}3\,\tau_{dop}$
— po Huberu (i dr.)	$\xi = \sqrt{1 + 0{,}75\,(\alpha_0 T/M)^2}$	$\alpha_0 = \sigma_{dop}/1{,}73\,\tau_{dop}$
— po Mohru	$\xi = \sqrt{1 + (\alpha_0 T/M)^2}$	$\alpha_0 = \sigma_{dop}/2\,\tau_{dop}$

U svim je slučajevima σ_{dop} dopušteno normalno naprezanje, a τ_{dop} je dopušteno tangencijalno naprezanje (vidi str. 532).

DINAMIKA

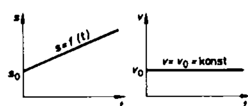
Dinamika je nauka o gibanju tijela. S obzirom na sile koje se javljaju pri gibanju, razlikujemo *kinematiku*, koja proučava gibanje tijela bez obzira na sile koje na nj djeluju, i *kinetiku*, koja proučava utjecaj djelovanja sila na gibanje tijela.

Kinematika

a) *Pravocrtno gibanje materijalne točke*

Oznake: put	s	brzina	$v = \dfrac{ds}{dt}$
početni put	s_0	početna brzina	v_0
vrijeme	t	ubrzanje	$a = \dfrac{dv}{dt}$

Jednoliko gibanje $\quad v = v_0 = \dfrac{ds}{dt} = \text{konst} \quad (a = 0)$



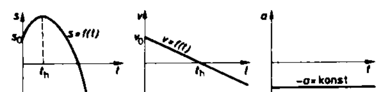
	Za $s_0 = 0$:
$s = s_0 + vt$	$s = vt$
$t = (s - s_0)/v$	$t = s/v$
$v = (s - s_0)/t$	$v = s/t$

Jednoliko ubrzano gibanje $\quad a = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{d^2s}{dt^2} = \text{konst}$

Ubrzanje $+a$



Usporenje $-a$



	Za $s_0 = 0$, $v_0 = 0$:
$s = s_0 + (v + v_0)t/2$	$s = vt/2$
$s = s_0 + (v^2 - v_0^2)/2a$	$s = v^2/2a$
$s = s_0 + v_0 t + at^2/2$	$s = at^2/2$
$v = v_0 + at$	$v = at$

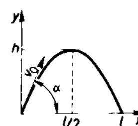
Primjer — slobodni pad $\quad$ ubrzanje $a = g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$
dubina $s = h$

$$v = gt = \sqrt{2gh} \qquad t = v/g = \sqrt{2h/g}$$

b) *Krivocrtno gibanje materijalne točke*

Svako je krivocrtno gibanje ubrzano, jer se mijenja smjer brzine. Ubrzanje je uvijek usmjereno prema konkavnoj strani putanje. (Smjer ubrzanja ne podudara se sa smjerom brzine.)

Kosi hitac (u zrakopraznom prostoru)



Početna brzina v_0 pod kutom α

$x = v_0 t \cos\alpha \qquad y = v_0 t \sin\alpha - g t^2/2$

$v_x = v_0 \cos\alpha \qquad v_y = v_0 \sin\alpha - g t$

Trajanje uspona ($v_y = 0$) $\qquad t_h = v_0 \sin\alpha / g$

Visina hica $\qquad h = v_0^2/2g \cdot \sin^2\alpha \qquad h_{max} = v_0^2/2g \quad$ pri $\alpha = 90°$

Domet hica $\qquad l = v_0^2/g \cdot \sin 2\alpha \qquad l_{max} = v_0^2/g \quad$ pri $\alpha = 45°$

c) *Kružno gibanje*

Oznake: kut	$\hat{\varphi}$ (rad)	kutna brzina	$\omega = \dfrac{d\hat{\varphi}}{dt}$
vrijeme	t	kutno ubrzanje	$\varepsilon = \dfrac{d\omega}{dt}$

Jednoliko kružno gibanje $\quad \omega = \dfrac{d\hat{\varphi}}{dt} = \text{konst} \qquad \hat{\varphi} = \omega t$

Trajanje 1 okretaja (period vrtnje)	$T = 2\pi/\omega$	
Kružna frekvencija	$f = 1/T$	(s^{-1})
Brzina vrtnje	$n = \omega/2\pi$	(okr./s)
Obodna brzina (na polumjeru r)	$u = r\omega = 2r\pi n$	

d) *Harmonijsko titranje*

Harmonijsko titranje je pravocrtno gibanje amo-tamo pri kojem je ubrzanje razmjerno putu.

Otklon $\quad x = r \sin\varphi \qquad r$ — amplituda

$\hat{\varphi}$ (rad) $= \omega t \qquad (\omega = \text{konst})$

$x = r \sin\omega t$

Period (trajanje titraja)	$T = 2\pi/\omega$
Frekvencija	$f = 1/T = \omega/2\pi$
Brzina	$v = r\omega\cos\omega t$
Ubrzanje	$a = -r\omega^2 \sin\omega t = -\omega^2 x$

Kinetika

a) N e w t o n o v z a k o n (osnovni zakon dinamike)

»Sila F je jednaka umnošku mase m i ubrzanja a« $\quad F = ma$

Ako su vektori sile i ubrzanja istog smjera, vrijedi $F = ma$.

Suma komponenta (F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}) sile F_i koja djeluje na masu m proporcionalna je s komponentama ubrzanja (a_x, a_y, a_z)

$$\sum F_{ix} = m\,a_x \qquad \sum F_{iy} = m\,a_y \qquad \sum F_{iz} = m\,a_z$$

Izraz ($-\,ma$) nazivamo »silom tromosti«.

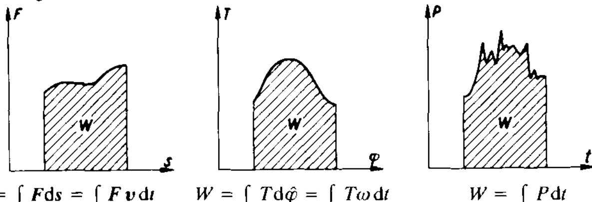
Mehanički je sustav u dinamičkoj ravnoteži ako je suma svih vanjskih sila koje na nj djeluju i svih sila tromosti sustava jednaka nuli (D'Alembertov princip)

$$\sum F_i - \sum m_i a_i = 0$$

b) Z a k r e t n i m o m e n t T sile F na kraku r $\quad T = Fr$

Obodna sila $\quad F = T/r$

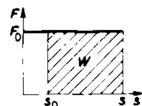
c) R a d W sile F na putu s ili zakretnog momenta T pri zakretu za kut $\hat{\varphi}$ (rad) ili snage P u vremenu t iznosi



$W = \int F\mathrm{d}s = \int \boldsymbol{F}\boldsymbol{v}\mathrm{d}t \qquad W = \int T\mathrm{d}\hat{\varphi} = \int T\omega\mathrm{d}t \qquad W = \int P\mathrm{d}t$

Kad su vektori $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{v}$ i $\boldsymbol{s}$ istog smjera vrijedi:

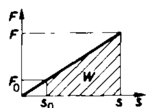
$F =$ konst $\quad W = Fs \qquad T =$ konst $\quad W = T\hat{\varphi} \qquad P =$ konst $\quad W = Pt$



Rad pomaka

$$F = F_0 = \text{konst}$$

$$W = \int_{s_0}^{s} F\mathrm{d}s = F(s - s_0)$$



Elastični deformacijski rad

$F = ks$

k – konstanta elastičnosti opruge

$$W = \int_{s_0}^{s} F\mathrm{d}s = k\,\frac{s^2 - s_0^2}{2} = \frac{F + F_0}{2}\,(s - s_0)$$

d) S n a g a P je rad obavljen u jedinici vremena t

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{v} = \boldsymbol{F}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{s}}{\mathrm{d}t} \qquad P = T\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$

U isto usmjerenih vektora $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{v}$ i $\boldsymbol{s}$ i pri konstantnoj snazi P vrijedi

$$P = W/t \qquad P = Fv \qquad P = T\omega = T2\pi n$$

e) K o r i s n o s t

Korisnost nekog procesa, stroja ili uređaja jest omjer između korisno dobivene energije W (snage P) i utrošene energije W_0 (snage P_0)

$$\eta = W/W_0 = P/P_0 < 1$$

f) K i n e t i č k a e n e r g i j a W_k je energija mase u gibanju.

Pri pravocrtnom gibanju izražavamo kinetičku energiju masom m i brzinom v

$$W_k = mv^2/2$$

Pri kružnom gibanju izražavamo kinetičku energiju momentom tromosti mase J (vidi str. 129) i kutnom brzinom ω

$$W_k = J\omega^2/2$$

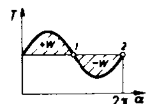
Za promjenu kinetičke energije

od $\quad W_0 = mv_0^2/2 + J\omega_0^2/2 \quad$ na $\quad W_k = mv^2/2 + J\omega^2/2$

potreban je rad

$$W = m(v^2 - v_0^2)/2 + J(\omega^2 - \omega_0^2)/2$$

Z a m a š n j a k



Nejednoliki zakretni moment T pogonskog stroja, koji se mijenja za vrijeme jednog okretaja (2π), povećava kutnu brzinu zamašnjaka do ω_{max} (u točki 1) i smanjuje je do ω_{min} (u točki 2).

Prosječna kutna brzina $\quad \omega_{med} = (\omega_{max} + \omega_{min})/2$

Stupanj nejednolikosti $\quad \delta = (\omega_{max} - \omega_{min})/\omega_{med}$

Primljeni odnosno predani rad zamašnjaka, koji ima moment tromosti mase J i prosječnu brzinu vrtnje n, iznosi

$$W = J(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)/2 = J\omega_{med}^2\delta = J \cdot 4\pi^2 n_{med}\delta$$

g) P o t e n c i j a l n a e n e r g i j a W_p je energija položaja (stanja). Tijelo mase m, tj. težine $G = mg$, ima, s obzirom na neku ravninu, iznad koje se nalazi na visini h, potencijalnu energiju (energiju položaja)

$$W_p = mgh = Gh$$

Osim toga primjera, potencijalna se energija pojavljuje i kao energija napete opruge ili komprimiranog plina, kao toplinska ili kemijska energija itd.

h) **Impuls sile** $\boldsymbol{F}\mathrm{d}t$ izražava djelovanje sile $\boldsymbol{F}$ u vremenu t, a jednak je promjeni **količine gibanja** $m\boldsymbol{v}$

$$\boldsymbol{F}\mathrm{d}t = m\mathrm{d}\boldsymbol{v}$$

$$\int \boldsymbol{F}\mathrm{d}t = m(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0)$$

gdje je $\boldsymbol{v}_0$ — početna brzina.

Za $\boldsymbol{F}$ = konst vrijedi

$$\boldsymbol{F}t = m(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0)$$

Ako su vektori $\boldsymbol{F}$ i $\boldsymbol{v}$ istoga smjera, bit će

$$Ft = m(v - v_0)$$

*

Za sustav materijalnih točaka vrijedi

$$\sum \boldsymbol{F}_i = \boldsymbol{a}_0 \sum m_i$$

gdje je $\boldsymbol{a}_0$ ubrzanje težišta.

Težište sustava materijalnih točaka giba se kao da je u njemu združena sva masa sustava sa svim vanjskim silama koje na nj djeluju.

Nema li vanjskih sila (odnosno ako su u međusobnoj ravnoteži pa je njihova rezultanta jednaka nuli), vrijedi

$$\sum m_i \boldsymbol{a}_i = 0$$

$$\sum m_i \boldsymbol{v}_i = \text{konst}$$

i) **Moment impulsa** $\boldsymbol{T}\mathrm{d}t$ je moment količine gibanja $m\boldsymbol{v}$ s obzirom na neku točku (pol) ili os

$$\boldsymbol{T}\mathrm{d}t = \boldsymbol{r}m\mathrm{d}\boldsymbol{v} = J\mathrm{d}\omega$$

$$\int \boldsymbol{T}\mathrm{d}t = \boldsymbol{r}m(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0) = J(\omega - \omega_0)$$

gdje su: $\boldsymbol{r}$ — okomita udaljenost točke (osi) od smjera vektora brzine $\boldsymbol{v}$, J — moment tromosti mase s obzirom na točku (os), ω — kutna brzina.

Moment impulsa je vektor koji je okomit na ravninu vektora $\boldsymbol{v}$ i $\boldsymbol{r}$.

Pri rotaciji sustava materijalnih točaka oko neke osi vrijedi

$$\int T\mathrm{d}t = \int Fr\mathrm{d}t = \sum (r_i m_i v_i) - \sum (r_i m_i v_{i0}) = J(\omega - \omega_0)$$

Moment tromosti mase

— aksijalni (s obzirom na os x)

$$J_x = \int r_x^2 \mathrm{d}m \qquad r_x^2 = y^2 + z^2$$

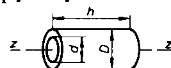
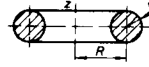
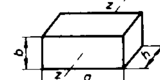
— polarni (s obzirom na pol)

$$J = \int r^2 \mathrm{d}m \qquad r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Polumjer tromosti i $\quad i = \sqrt{J/m} \qquad J = mi^2$

Zamašni moment mD^2 $\quad i = D/2 \qquad J = mD^2/4 \qquad mD^2 = 4J$

Momenti tromosti mase tijela (gustoće ϱ)

Valjak 	$J_z = \frac{1}{2} m r^2 = \frac{\pi}{32} d^4 h \varrho$ $m = d^2\pi/4 \cdot h\varrho$
Šuplji valjak 	$J_z = \frac{1}{2} m(R^2 + r^2) = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) h\varrho$ $m = (D^2 - d^2)\pi/4 \cdot h\varrho$
tankih stijena $d_m = (D + d)/2$ $s = (D - d)/2$	$J_z \approx m r_m^2 = \frac{\pi}{4} d_m^3 s h \varrho$ $m \approx d_m \pi s h \varrho$
Kugla $d = 2r$ (os z kroz središte)	$J_z = \frac{2}{5} m r^2 = \frac{\pi}{60} d^5 \varrho$ $m = \pi/6 \cdot d^3 \varrho$
Šuplja kugla $D = 2R$ $d = 2r$	$J_z = \frac{2}{5} m \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3} = \frac{\pi}{60}(D^5 - d^5)\varrho$ $m = \pi/6 \cdot (D^3 - d^3)\varrho$
tankih stijena $d_m = (D + d)/2$ $s = (D - d)/2$	$J_z \approx \frac{2}{3} m r_m^2 = \frac{\pi}{6} d_m^4 s \varrho$ $m \approx \pi d_m^2 s \varrho$
Prsten 	$J_z \approx m\left(R^2 + \frac{3}{4} r^2\right) = 2\pi^2 R r^2 \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2\right)\varrho$ $m \approx 2\pi^2 R r^2 \varrho$
Ploča 	$J_z = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2) = \frac{1}{12} abh(a^2 + b^2)\varrho$ $m = abh\varrho$

Steinerovo pravilo

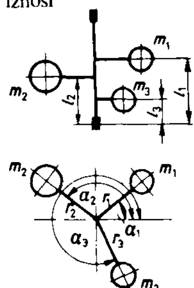
$$J_a = J_t + me^2$$

J_t — moment tromosti tijela s obzirom na os kroz težište tijela

J_a — moment tromosti tijela s obzirom na os koja je paralelna s osi kroz težište i od nje udaljena za e

Centrifugalna sila F_c mase m, koja rotira obodnom brzinom u odnosno kutnom brzinom ω na polumjeru r_0 (udaljenost težišta tijela od osi rotacije) iznosi

$$F_c = m u^2/r_0 = m r_0 \omega^2$$



Dinamička ravnoteža

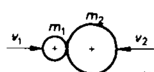
Osovina je u dinamičkoj ravnoteži ako na nju ne djeluju nikakve centrifugalne sile ili se utjecaji tih sila međusobno poništavaju (»slobodna osovina«).

Uvjeti dinamičke ravnoteže su:

$$\sum mr\sin\alpha = 0$$
$$\sum mr\cos\alpha = 0$$
$$\sum mrl\sin\alpha = 0$$
$$\sum mrl\cos\alpha = 0$$

Sudar je dodir dvaju tijela koji se zbiva u vrlo kratkom vremenu razmjerno velikim silama.

Centralni sudar



Mase m_1 i m_2 koje se giblju po istom pravcu sudaraju se brzinama (prije sudara) v_1 odn. v_2.

Brzine masa m_1 i m_2 nakon sudara

$$u_1 = v_1 - (1 + \varepsilon)(v_1 - v_2)\frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = v_2 + (1 + \varepsilon)(v_1 - v_2)\frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

Koeficient sudara

$$\varepsilon = (u_2 - u_1)/(v_1 - v_2)$$

Zbog gubitaka je (zvuk, deformacija, toplina) $0 < \varepsilon < 1$:

materijal obaju tijela	staklo	čelik	slonovača	pluto	drvo
ε	0,95	0,6...0,95	0,9	0,55	0,5

(ε u čeliku raste s tvrdoćom)

$\varepsilon = 0$ potpuno plastičan sudar

$$u_1 = u_2 = (m_1 v_1 + m_2 v_2)/(m_1 + m_2)$$

$\varepsilon = 1$ potpuno elastičan sudar

$$u_1 = v_1 - 2(v_1 - v_2)m_2/(m_1 + m_2)$$
$$u_2 = v_2 + 2(v_1 - v_2)m_1/(m_1 + m_2)$$

Gubitak energije pri sudaru

$$W = (1 - \varepsilon^2)(v_1 - v_2)^2 m_1 m_2 / 2(m_1 + m_2)$$

Titranje

1. *Slobodno neprigušeno titranje*

Giba li se materijalna točka periodično s frekvencijom f tako, da je sila F koja na nju djeluje razmjerna razmaku y od središnjeg položaja, a suprotna po smjeru, bit će gibanje harmonijsko

$$F = -cy \qquad c - \text{konstanta opruge}$$

Vlastita frekvencija f neprigušenoga harmonijskoga titranja

$$f = 1/2\pi \cdot \sqrt{c/m}$$

Iz diferencijalne jednadžbe neprigušenoga harmonijskoga titranja

$$m(\mathrm{d}^2y/\mathrm{d}t^2) + cy = 0$$

proizlazi rješenje:

– put	$y = y_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$	y_m	– amplituda
– brzina	$v = v_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\lvert v_m \rvert = \omega y_m$	
– ubrzanje	$a = -a_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$	$\lvert a_m \rvert = \omega^2 y_m$	

gdje znače:

t – vrijeme $\qquad \varphi$ – faznu konstantu

$\omega_0 = 2\pi f$ – »kružna frekvencija« vlastitog titranja

$\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – pri običnom titranju

$\omega_0 = \sqrt{c/J}$ – pri kružnom titranju

Period (vrijeme njihaja) $\quad T = 1/f = 2\pi/\omega_0$

2. *Prigušeno slobodno titranje*

Djeluje li na materijalnu točku što titra otpor R koji je razmjeran brzini, ali suprotan po smjeru, bit će titranje prigušeno

$$R = -k(\mathrm{d}y/\mathrm{d}t) \qquad k = \text{konstanta prigušivanja}$$

Za prigušeno titranje vrijedi diferencijalna jednadžba

$$m(\mathrm{d}^2y/\mathrm{d}t^2) + k(\mathrm{d}y/\mathrm{d}t) + cy = 0$$

Uvođenjem izraza

$$\lambda = k/2m = \nu\omega_0 \qquad \nu = k/2\sqrt{cm}$$

dobivamo rješenje diferencijalne jednadžbe

$$y = y_0 e^{-\lambda t} \sin(\omega t + \varphi)$$

gdje je kružna frekvencija prigušenoga titranja

$$\omega = \sqrt{(c/m) - \lambda} = \omega_0\sqrt{1 - \nu^2}$$

$\nu = 0$ – neprigušeno njihanje $\qquad \nu < 1$ – periodičko prigušeno titranje

Pri aperiodičnom gibanju ($\nu > 1$) nema titranja pa se put y postupno približava nuli.

3. *Prisilno titranje*

Na materijalnu točku koja titra djeluje — osim otpora R — još i vanjska sila F, npr.

$$F = F_0 \sin \omega t$$

Za takvo titranje vrijedi jednadžba

$$m(\mathrm{d}^2 y/\mathrm{d}t^2) + k(\mathrm{d}y/\mathrm{d}t) + cy = F_0 \sin \omega t$$

Približava li se kružna frekvencija ω prisilnog titranja kružnoj frekvenciji ω_0 vlastitog titranja, amplituda titranja se povećava i dostiže maksimum (rezonancija) pri kružnoj frekvenciji

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - 2\nu^2}$$

odnosno, uz neznatno prigušivanje pri kritičnoj kružnoj frekvenciji ω_k

$$\omega_k = \omega_0 = \sqrt{c/m}$$

Pri prisilnom titranju bez prigušivanja postala bi amplituda kritične kružne frekvencije beskonačno velikom.

4. *Kritična brzina vrtnje osovine*

Karakteristika je elastičnog progiba osovine omjer c između sile F i deformacije y

$$c = F/y$$

Pri ekscentričnosti e težišta osovine mase m djeluje na nju pri rotaciji sila F_c, koja dodatno opterećuje osovinu za vrijednost y. Centrifugalna sila, koja zahvaća u težištu, udaljenom za $e + y$ od središnjice osovine u mirovanju, iznosi pri rotaciji kutnom brzinom ω

$$F_c = m\omega^2(e + y) = cy$$

Progib osovine pri rotaciji iznosi

$$y = (me\omega^2)/(c - m\omega^2)$$

Za kutnu brzinu kod koje bi bilo $c = m\omega^2$ (ne uzimajući u obzir prigušivanje) bilo bi $y = \infty$. Tome odgovaraju

kritična kutna brzina $\omega_k = \sqrt{c/m}$
kritična brzina vrtnje $n_k = \omega_k/2\pi$

Za određivanje omjera c elastičnog progiba može se uzeti progib y_0 osovine u mirovanju što ga izaziva težina osovine $G = mg$:

$$c = G/y_0 = mg/y_0 \qquad \omega_k = \sqrt{g/y_0}$$

Naraste li kutna brzina ω iznad kritične ω_k

$$\omega > \omega_k$$

smanjit će se progib y osovine pri rotaciji (osovina će se sama centrirati).

HIDROMEHANIKA

Zakone hidromehanike primjenjujemo za fluide (tekućine u širem smislu), tj. na sve kapljevine (tekućine u užem smislu) i na plinove do granice do koje ih još možemo smatrati praktički nestlačivima (inkompresibilnima), tj. do brzine strujanja oko 100 m/s. Isključene su tzv. neprave tekućine, kao npr. katran, asfalt, med i sl.

Kod nestlačivog fluida mase m jesu volumen V i gustoća ϱ konstantni

$$V = \text{konst} \qquad \varrho = m/V = \text{konst}$$

U *idealnom fluidu* nema sila trenja. Takav fluid ne postoji, ali njime često pojednostavljujemo računske probleme. U *realnom fluidu* postoji trenje između čestica – fluid je viskozan.

Viskoznost je otpor fluida protiv tangencijalnih sila ili kutnih deformacija čestica.

Dinamička viskoznost η definirana je Newtonovim zakonom.

$$\tau = \eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$$

τ je naprezanje na smik, $\mathrm{d}v$ je razlika u brzini slojeva na razmaku $\mathrm{d}y$, η je apsolutna (dinamička) viskoznost.

Kinematička viskoznost ν je omjer dinamičke viskoznosti η i gustoće ϱ

$$\nu = \frac{\eta}{\varrho}$$

Mjere za viskoznost – vidi str. 65 i 72. Brojčane vrijednosti za kinematičku viskoznost – vidi u tablicama na str. 212 do 214.

HIDROSTATIKA

Hidrostatički tlak p je tlak u tekućini, što ga uzrokuje težina. Ovisi samo o visini h razine (nivoa) tekućine iznad mjesta mjerenja i gustoći tekućine ϱ

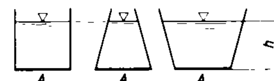
$$p = h\varrho g$$

gdje je g zemaljsko ubrzanje (= 9,81 m/s²).

Sila tlaka F na horizontalno dno posude ovisi samo o hidrostatičkom tlaku p i o površini dna A

$$F = pA = h\varrho gA$$

Ta sila tlaka, međutim, ne ovisi o obliku posude (»hidrostatički paradoks«).



U z g o n F_v je sila kojom tekućina djeluje okomito prema gore na tijelo uronjeno u tekućinu. Po veličini je jednak težini istisnute tekućine, a hvatište mu je u njezinu težištu (Arhimedov zakon)

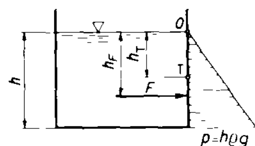
$$F_v = mg = \varrho g V$$

m je masa, V volumen istisnute tekućine (istisnine), a ϱ njena gustoća.

S i l a   t l a k a   n a   s t i j e n k e

Sila tlaka F tekućine gustoće ϱ na ravnu stijenku posude kojoj je omočena ploha površine A iznosi

$$F = h_T \varrho g A$$

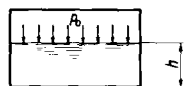


h_T je vertikalna udaljenost težišta (T) omočene plohe od razine tekućine. Hvatište sile F je, međutim, ispod težišta plohe, na dubini

$$h_F = \frac{I}{h_T A}$$

gdje je I geometrijski moment tromosti omočene plohe s obzirom na njezin rub u visini razine tekućine (0).

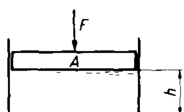
P a s c a l o v   z a k o n



Narinuti tlak širi se po tekućini nesmanjeno i jednako u svim smjerovima.

Tlak p na dno posude u kojoj je iznad površine tekućine (visine h i gustoće ϱ) tlak p_0

$$p = p_0 + h\varrho g$$



Tlak p na dno posude, uzrokovan u tekućini silom F na stap površine A iznosi

$$p = \frac{F}{A} + h\varrho g$$

Atmosferski tlak p_a na površini tekućine prouzrokuje u tekućini stvarni tlak koji je veći od hidrostatičkog i iznosi

$$p = p_a + h\varrho g$$

Pri proračunavanju posuda s obzirom na tlak tekućine, atmosferski tlak u tekućini ne uzimamo u obzir jer on djeluje i s druge strane stijenke posude, pa se djelovanja, u odnosu na stijenke, međusobno poništavaju.

Atmosfersko stanje

Zračni tlak p_a, temperatura t i gustoća ϱ
Višegodišnji prosjek *(po: Mende/Simon)*

Godišnje doba	Tlak p_a mbar		Temperatura t °C		Gustoća ϱ kg/m³	
	na visini h (m)					
	0	2000	0	2000	0	2000
siječanj	1 019	791	0	−3	1,28	1,026
srpanj	1 015	799	16	7	1,23	0,996
godišnji prosjek	1 016	795	8	0	1,25	1,008

Zbog vremenskih upliva mijenjaju se: zračni tlak za ±5%, gustoća zraka za ±20%, a relativna vlaga (vidi str. 193) među 60 i 100%.

Pri potpunoj zasićenosti zraka (φ = 100%) zavisi apsolutna vlaga x o temperaturi t:

t	°C	−20	−10	0	10	20	30
x	g/m³	0,883	2,14	4,86	9,46	17,5	31,1

S t a n d a r d n e   (n o r m n e)   v r i j e d n o s t i zračnoga tlaka p_a, temperature t i gustoće ϱ pri različitim nadmorskim visinama h (po ICAO – *International Civil Aviation Organization)*

h m	p_a mbar	t °C	ϱ kg/m³	h m	p_a mbar	t °C	ϱ kg/m³
0	1 013	15	1,225	2 500	737	− 1,25	0,945
100	1 001	14,35	1,214	3 000	701	− 4,5	0,910
200	989	13,7	1,202	4 000	616	−11	0,819
300	978	13,05	1,191	5 000	540	−17,5	0,736
400	966	12,4	1,179	6 000	472	−24	0,660
500	954	11,75	1,167	8 000	356	−37	0,526
600	943	11,1	1,157	10 000	265	−50	0,413
800	921	9,8	1,135	12 000	195	−56,5	0,314
1 000	898	8,5	1,111	15 000	121	−56,5	0,195
1 200	877	7,2	1,091	20 000	55	−56,5	0,0889
1 500	845	5,25	1,060	25 000	25	−56,5	0,0406
2 000	795	2,0	1,007	30 000	12	−42,8	0,0179

Kinematička viskoznost v pri različitim nadmorskim visinama h:

h	km	0	5	10	15	20	25	30
v	mm²/s	14,61	22,10	35,23	73,03	160,0	350,0	835,7

HIDRODINAMIKA

Promatramo stacionarno strujanje, tj. ono, pri kojem brzina u određenoj točki ne mijenja s vremenom ni veličinu ni smjer.

Laminarno strujanje je ono, pri kojem se čestice gibaju u beskonačno tankim slojevima, što se kližu jedan po drugome bez miješanja. *Turbulentno strujanje* je ono, pri kojem se čestice gibaju nepravilno u svim smjerovima. U obzir uzimamo samo njihovo prosječno gibanje u smjeru strujanja.

Jednadžba kontinuiteta glasi da je protok mase q_m = konst, što možemo izraziti presjekom A, brzinom v i gustoćom ϱ

$$q_m = A v \varrho = \text{konst}$$

Za nestlačive fluide, za koje vrijedi ϱ = konst, i volumenski je protok q_V = = konst

$$q_V = A v = \text{konst}$$

Bernoullijeva jednadžba za stacionarno strujanje nestlačivog fluida (bez trenja) glasi, da je suma svih energija (položajne + tlačne + brzinske) u svakom presjeku (na svakoj strujnici) konstantna. Bernoullijevu jednadžbu možemo izraziti (za dva promatrana presjeka 1 i 2)

– specifičnom energijom s obzirom na jedinicu mase

$$z_1 g + \frac{p_1}{\varrho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\varrho} + \frac{v_2^2}{2} = e = \text{konst}$$

– tlakom (energijom za jedinicu volumena)

$$z_1 \varrho g + p_1 + \varrho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \varrho g + p_2 + \varrho \frac{v_2^2}{2} = p = \text{konst}$$

– tlačnom visinom (energijom za jedinicu težine)

$$z_1 + \frac{p_1}{\varrho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\varrho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{konst}$$

Bernoullijeva jednadžba za stacionarno strujanje realnog fluida uzima u obzir gubitke (od presjeka 1 do 2), koje izražavamo gubitkom tlaka Δp_t

$$z_1 \varrho g + p_1 + \varrho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \varrho g + p_2 + \varrho \frac{v_2^2}{2} + \Delta p_t$$

ili gubitkom tlačne visine Δh_t

$$z_1 + \frac{p_1}{\varrho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\varrho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_t$$

U tim su jednadžbama: z_i – geodetska visina nad po volji odabranim horizontom, $p_i = h_i \varrho g$ statički tlak u fluidu (gdje je h_i tlačna visina), ϱ – gustoća i v_i – brzina strujanja.

Gubitak tlaka Δp_t ili tlačne visine Δh_t računamo s pomoću Darcyjeve formule (str. 141).

Bernoullijeva jednadžba za sustav koji jednoliko rotira (s gubicima)

$$z_1 \varrho g + p_1 + \varrho w_1^2/2 - \varrho u_1^2/2 = z_2 \varrho g + p_2 + \varrho w_2^2/2 - \varrho u_2^2/2 + \Delta p_t$$

Osim oznaka navedenih na kraju str. 136, u ovoj jednadžbi znače: w_i – relativnu brzinu fluida (s obzirom na rotirajući kanal), u_i – obodnu brzinu rotacije sustava.

Impulsni stavak

Struja fluida protoka mase q_m promijenit će pod utjecajem vanjskih sila (kojih je suma F) brzinu za $\Delta \boldsymbol{v}$

$$F = q_m \cdot \Delta \boldsymbol{v} = q_m(\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1) = -R$$

$q_m \boldsymbol{v}$ — sekundni impuls.

Budući da su sile i brzine vektorske naravi, treba istaknuti da je smjer sile F (odn. — R) identičan sa smjerom promjene brzine $\Delta \boldsymbol{v}$.

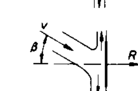
Sila F kojom okoliš djeluje na fluid, jest aktivna sila, dok je sila R kojom fluid djeluje na okoliš — reaktivna sila. (Npr. u turbinama fluid djeluje na lopatice silom R, dok u pumpama lopatice djeluju na fluid silom F.)

Pritisak mlaza na plohu

Protok mase mlaza je q_m, brzina mlaza je $\boldsymbol{v}$.

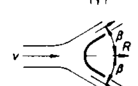


Ravna ploča smještena okomito na smjer mlaza izvrgnuta je pritisku mlaza $R = q_m v$

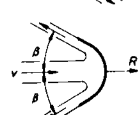


Ravna ploča o koju udara mlaz pod kutom β izvrgnuta je pritisku mlaza

$$R = q_m v \cos\beta$$



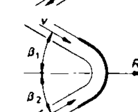
Konveksna ploča o koju udara mlaz u sredini i otklanja se od prvobitnog smjera pod kutom β izvrgnuta je pritisku mlaza $R = q_m v(1 - \cos\beta)$



Konkavna ploča o koju udara mlaz u sredini i skreće unatrag pod kutom β izvrgnuta je pritisku

$$R = q_m v(1 + \cos\beta)$$

Za kut $\beta = 0°$ pritisak mlaza iznosi $R = 2 q_m v$



Konkavna ploča o koju udara mlaz pod kutom β_1 i skreće unatrag pod kutom β_2 izvrgnuta je pritisku mlaza

$$R = q_m v(\cos\beta_1 + \cos\beta_2)$$

Za kutove $\beta_1 = \beta_2 = 0°$ pritisak mlaza iznosi $R = 2 q_m v$

Reakcija mlaza koji izlazi s protokom mase q_m i brzinom $\boldsymbol{v}$ kroz izlazni otvor presjeka A iz posude gdje vlada tlak p iznosi

$$R = q_m v = 2 A p$$

Brzina istjecanja

Teoretska brzina istjecanja kroz maleni otvor iz otvorene posude u kojoj je stalna razina tekućine visine h iznad izlaza (Torricellijeva formula)

$$v_0 = \sqrt{2gh}$$

gdje je g ubrzanje sile teže.

Teoretska brzina istjecanja iz posude u kojoj je iznad tekućine gustoće ϱ pretlak Δp

$$v_0 = \sqrt{2(gh + \Delta p/\varrho)}$$

Ako visinu h ne treba uzeti u obzir (kod plinova i para), teoretska brzina istjecanja pri pretlaku Δp

$$v_0 = \sqrt{2\frac{\Delta p}{\varrho}}$$

Zbog trenja u mlazu i o sapnicu bit će stvarna brzina manja

$$v = \varphi v_0$$

U dobro zaobljene sapnice koeficijent je brzine $\varphi = 0{,}95 \ldots 0{,}99$.

Količina istjecanja

a) Količina istjecaja kroz otvor presjeka A izražena protokom mase q_m iznosi

$$q_m = A v \varrho$$

gdje je v izlazna brzina i ϱ gustoća fluida.

Zbog kontrakcije mlaza μ i uzimajući u obzir koeficijent brzine φ dobivamo

$$q_m = \alpha A v_0 \varrho$$

α je koeficijent istjecanja koji združuje koeficijente kontrakcije i brzine: $\alpha = \mu\varphi$.

Pri istjecanju tekućine iz otvorene posude je

$$q_m = \alpha A \varrho \sqrt{2gh}$$

Za istjecanje iz zatvorene posude u kojoj je iznad površine tekućine pretlak Δp vrijedi

$$q_m = \alpha A \varrho \sqrt{2(gh + \Delta p/\varrho)}$$

Za $h = 0$ (što vrijedi za plinove i pare) dobiva se

$$q_m = \alpha A \sqrt{2\varrho \cdot \Delta p}$$

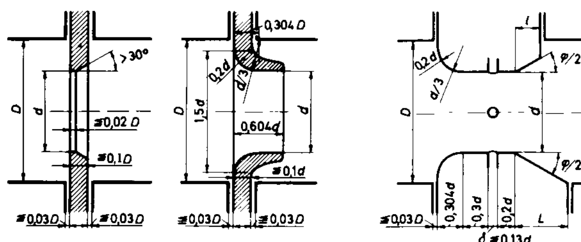
b) Količina istjecanja kroz otvor presjeka A izražena volumenskim protokom fluida q_V iznosi

$$q_V = q_m/\varrho = \alpha A v_0$$

Protok

1. Za određivanje protoka kroz cjevovod služe:

prigušnice — *sapnice* — *Venturijeve sapnice (gore - kraći, dolje - dulji oblik)*



Protječe li najužim otvorom presjeka A fluid gustoće ϱ, nastat će pad tlaka Δp. Protok izražavamo:

– protokom mase q_m $\qquad q_m = \alpha A \sqrt{2\varrho \cdot \Delta p}$

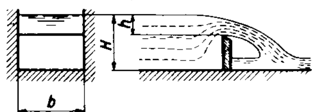
– volumenskim protokom q_V $\qquad q_V = \alpha A \sqrt{2 \cdot \Delta p/\varrho}$

Koeficijent protjecanja α određen je za svaku vrstu mjernog uređaja u ovisnosti o omjeru $m = (d/D)^2$, gdje je D promjer cijevi, a d promjer otvora protjecanja kojemu je prosjek $A (= d^2\pi/4)$.

Gubitak tlaka u prigušnici odnosno sapnici Δp_t ovisan je o omjeru m:

$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	Koeficient α za		
	prigušnice	sapnice	venturijeve sapnice
0,05	0,598	–	–
0,10	0,602	0,989	0,989
0,15	0,608	0,993	0,994
0,20	0,615	0,999	1,001
0,25	0,624	1,005	1,010
0,30	0,634	1,015	1,020
0,35	0,645	1,029	1,032
0,40	0,660	1,043	1,048
0,45	0,676	1,060	1,067
0,50	0,695	1,081	1,091
0,55	0,716	1,108	1,120
0,60	0,740	1,142	1,155
0,65	0,768	1,183	–
Δp_t	$(1 - m) \cdot \Delta p$	$(1-m)/(1+m) \cdot \Delta p$	$\approx 0{,}1 \cdot \Delta p$

2. Protok u otvorenim kanalima mjerimo s pomoću preljeva. Za pravokutni preljev visine h i širine b vrijedi



$$q_V = \frac{2}{3} \mu h b \sqrt{2gh}$$

Koeficijent μ ovisan je o visinama H i h te iznosi

	h (m)					
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,800
$H = 0{,}6$ m	0,639	0,629	0,630	0,652	—	—
$H = 1{,}0$ m	0,638	0,628	0,624	0,630	0,666	—
$H = 1{,}6$ m	0,638	0.627	0,622	0,623	0,636	0,693
$H = 2{,}4$ m	0,638	0,627	0,622	0,620	0,626	0,650

Zakoni sličnosti strujanja

Promjene pri strujanju ne možemo obuhvatiti samo teoretskim sredstvima, već ih treba i mjeriti. Strujanja, međutim, ne moramo mjeriti na predmetima u naravnoj veličini, već to možemo načiniti i na geometrijski sličnim modelima (manjima ili većima). U tu svrhu se mora — osim geometrijske — postići još kinematička i dinamička sličnost strujanja.

Reynoldsova značajka Re je najviše upotrebljavani kriterij za sličnost strujanja nestlačivih tekućina u potpuno ispunjenim cijevima gdje težina ne utječe na profil brzine.

Reynoldsova značajka (bezdimenzijska) jest omjer silâ tromosti i sila trenja i iznosi

$$Re = \frac{v\,l}{\nu}$$

gdje su: v — brzina strujanja, l — karakteristična linearna dimenzija, ν — kinematička viskoznost.

Kinematička viskoznost ν iznosi (pri 20 °C) za vodu 1,01 mm²/s, za zrak pa 15,7 mm²/s. Kinematička viskoznost za vodo, zrak i druge fluide pri različnim temperaturama sabrana je na str. 212 do 214.

Kod okruglih je cijevi promjera d: $Re = vd/\nu$

Općenito vrijedi: $Re = vd'/\nu$

d' je tzv. »hidraulički promjer«

$$d' = 4A/O$$

gdje su: A — presjek voda, O — fluidom omočeni opseg.

Reynoldsovom značajkom razgraničujemo laminarno i turbulentno strujanje. Za strujanje u cijevima vrijedi $Re < 2320$ — laminarno strujanje

$Re > 2320$ — turbulentno strujanje

Otpori strujanja u cijevima i armaturama

Gubitak tlaka zbog otpora pri strujanju fluida gustoće ϱ brzinom v daje Darcyjeva formula

$$\Delta p = \zeta \varrho v^2/2$$

ζ je koeficijent gubitaka, koji za ravne cijevi kružnog presjeka iznosi

$$\zeta = \lambda l/d$$

λ je koeficijent trenja, l je duljina cijevi, d je promjer cijevi.

1. *Koeficijent trenja* λ

Koeficijent trenja λ ovisi o Reynoldsovoj značajci Re i relativnoj hrapavosti cijevi k/d, gdje je k apsolutna hrapavost (prosječna visina izbočina) stijenke.

U laminarnom području (do $Re < 2320$) λ ovisi o obliku cijevi i o Re, te iznosi

$$\lambda = \varphi\, 64/Re$$

φ je faktor oblika cijevi. Za okrugle je cijevi $\varphi = 1$ pa je

$$\lambda = 64/Re = 64\nu/vd$$

Pri turbulentnom strujanju ($Re > 2320$) razlikujemo:

a) *Hidraulički glatke cijevi.* Cijevi smatramo hidraulički glatkima do

$$Re \approx d/k \cdot \lg(0{,}1\, d/k) \approx 2\, d/k$$

Za proračun λ_g služi Prandtl-Karmanova formula

$$1/\sqrt{\lambda_g} = 2 \lg\left(0{,}398\, Re \sqrt{\lambda_g}\right)$$

Vrijednosti λ_g za različite Re:

Re	2320	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
λ_g	0,04725	0,03089	0,018	0,01165	0,00811	0,005945

Za praktičko računanje služimo se eksplicitnom, aproksimativnom Colebrookovom formulom

$$\lambda_g = 0{,}31/(\lg 0{,}143\, Re)^2$$

U cijelom praktički uporabivom području $Re = 5 \cdot 10^3 \ldots 10^8$ iznosi odstupanje $\approx \pm 1\%$.

b) *Prelazno područje*, u kojem vrijedi Colebrookova formula

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg\left(0{,}269\, k/d + 2{,}51/Re\sqrt{\lambda}\right)$$

praktički završava kod $Re \approx 400\, d/k \cdot \lg(3{,}715\, d/k) \approx 10^3 d/k$.

Za praktičko proračunavanje služi eksplicitna, aproksimativna Pečornikova formula

$$\lambda = 0{,}25/[\lg(15/Re + 0{,}269\,k/d)]^2$$

koja vrijedi s maksimalnom pogreškom od $\approx 6\%$ za $Re = 4 \cdot 10^3 \ldots 10^8$ i relativne hrapavosti $k/d = 10^{-2} \ldots 5 \cdot 10^{-6}$.

c) *Područje potpune hrapavosti* (koje obuhvaća vrijednosti $Re > 400\,d/k \cdot \lg(3{,}715\,d/k)$, u kojemu određujemo λ_h po Nikuradseovoj formuli

$$\lambda_h = 0{,}25/[\lg(3{,}715\,d/k)]^2$$

Vrijednosti λ_h za različite d/k:

d/k	10	40	60	100	200	500	1000
λ_h	0,1014	0,0529	0,0453	0,0378	0,0303	0,0234	0,0196

*

Sa stanovitim ograničenjima ($k/d < 0{,}01$ in $\lambda < 0{,}05$) i s nešto manjom točnošću ($\pm 5\%$) vrijedi u području $Re = 4 \cdot 10^3 \ldots 10^7$ (dakle u svim područjima) Moodyjeva formula

$$\lambda = 5{,}5 \cdot 10^{-3}\left(1 + \sqrt[3]{2 \cdot 10^4\,k/d + 10^6/Re}\right)$$

U glatkom području je $k/d = 0$, dok je u potpuno hrapavom području $Re \approx \infty$ pa formula prelazi u oblik

$$\lambda_h = 5{,}5 \cdot 10^{-3} + 0{,}15\sqrt[3]{k/d}$$

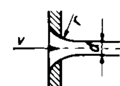
Apsolutne prosječne visine hrapavosti k (po Richteru)

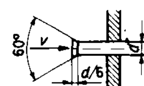
Materijal i stanje cijevi	k mm
Vučene cijevi od bakra, mjedi, bronce, aluminija, stakla, umjetnih tvari itd.	... 0,002
Vučene čelične cijevi — nove	0,02 ... 0,10
— malo zarđale	... 0,40
— jako inkrustirane	... 3
Zavarene čelične cijevi — nove	0,04 ... 0,10
— nove, prevučene bitumenom	≈ 0,05
— rabljene, jednoliko zarđale	≈ 0,15
— nakon višegodišnje uporabe	≈ 0,5
— malo inkrustirane	≈ 1,5
— jako inkrustirane	2 ... 4
Zakovane čelične cijevi (prema načinu izvedbe)	0,5 ... 10
Pocinčane čelične cijevi — nove	0,07 ... 0,15
Cijevi od lijevanog željeza — nove	0,25 ... 1
— nove, prevučene bitumenom	0,1 ... 0,15
— rabljene, malo zarđale	1 ... 1,5
— inkrustirane	1,5 ... 4
Drvene cijevi, nove (uporabom postaju glađe)	0,2 ... 1
Betonske cijevi — sirove	1 ... 3
— zaglađene	0,3 ... 0,8

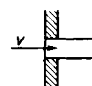
2. *Koeficijenti gubitaka* ζ

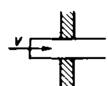
Ulazna ušća

zaobljena $r > 0{,}5\,d$	*konična (konfuzor)*	*oštra sa stijenkom*	*oštra bez stijenke*
$\zeta = 0{,}05$	$\zeta = 0{,}20$	$\zeta = 0{,}50$	$\zeta = 1{,}00$



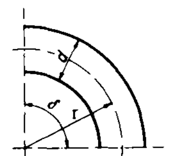






Kružni lukovi polumjera zakrivljenosti r, s kružnim ili kvadratnim presjekom i kutom skretanja $\delta = 90°$:

r/d	1,0	1,5	2	3	4	5	6	10
ζ	0,27	0,20	0,15	0,13	0,10	0,10	0,10	0,11



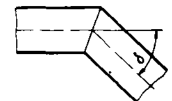
Navedeni ζ vrijede za tehnički glatke cijevi (npr. lim), dok za tehnički hrapave cijevi (npr. sivi lijev, ziđe i sl.) uzimamo dvostruke vrijednosti.

Za kutove $\delta = 0 \ldots 180°$ treba vrijednosti za ζ množiti s faktorom n:

δ	30°	60°	90°	120°	150°	180°
n	0,4	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7

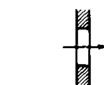
Koljena

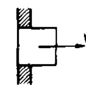
δ	15°	30°	45°	60°	90°	105°	120°
ζ_g	0,04	0,13	0,24	0,47	1,13	1,80	2,26
ζ_h	0,06	0,17	0,32	0,68	1,27	2,00	2,54

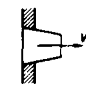


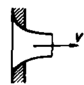
Vrijednosti ζ_g vrijede za glatke, a vrijednosti ζ_h za hrapave stijenke cijevi.

Izlazni otvori (otvori u stijenkama)



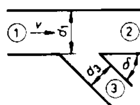






provrt u stijenki (oštri rubovi)	*cilindrični nastavak*	*konični nastavak*	*zaobljenje s nastavkom*
$\zeta = 1{,}8$	$\zeta = 0{,}5$	$\zeta = 0{,}25$	$\zeta = 0{,}1$

Odvojci



Volumenski protoci:

$q_{V1} = q_{V2} + q_{V3}$ – u dovodu 1,
q_{V2} – u dovodu 2, q_{V3} – u odvojku 3

Gubici – u odvodu 2: $\Delta p_2 = \zeta_2 \varrho v^2/2$
– u odvojku 3: $\Delta p_3 = \zeta_3 \varrho v^2/2$
v – brzina u dovodu 1

Odvojci jednakog kružnog presjeka ($d_1 = d_2 = d_3$)

q_{V3}/q_{V1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90°$	ζ_2	0,05	−0,08	−0,04	0,07	0,21	0,35
	ζ_3	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
$\delta = 45°$	ζ_2	0,04	−0,06	−0,04	0,07	0,20	0,33
	ζ_3	0,90	0,66	0,47	0,33	0,29	0,35

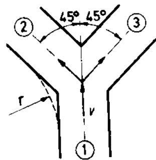
Odvojci jednakog kvadratnog presjeka

q_{V3}/q_{V1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90°$	ζ_2	0,04	0,00	0,05	0,15	0,28	0,42
	ζ_3	0,91	0,75	0,70	0,74	0,79	0,84
$\delta = 45°$	ζ_2	0,10	0,03	0,05	0,14	0,29	0,49
	ζ_3	0,88	0,65	0,47	0,32	0,20	0,18

Račve (*Y – komadi*) s kružnim ili kvadratnim presjekom površine A

Volumenski protok: u dovodu 1: q_V

Gubici: $\Delta p = \zeta \varrho v^2/2$



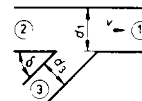
Protok	ζ za oštre rubove	
	$A_1 = A_2 = A_3$	$A_2 = A_3 = 0{,}5A_1$
od 1 prema 2 i 3	0,55	0,75
od 1 prema 2; dok je 3 zatvoren	0,50	1,35
smanjenje ζ pri zaobljenju (r) za	≈ 40%	≈ 40%

ζ se odnosi na brzinu v u dovodu 1.

Sastavci

Volumenski protoci:

$q_{V1} = q_{V2} + q_{V3}$ – u odvodu 1,
q_{V2} – u dovodu 2, q_{V3} – u priključku 3



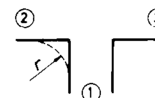
Gubici – u dovodu 2: $\Delta p_2 = \zeta_2 \varrho v^2/2$
– u priključku 3: $\Delta p_3 = \zeta_3 \varrho v^2/2$
v – brzina u odvodu 1

Sastavci jednakog kružnog presjeka ($d_1 = d_2 = d_3$)

q_{V3}/q_{V1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90°$	ζ_2	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	ζ_3	−1,04	−0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
$\delta = 45°$	ζ_2	0,05	0,17	0,18	0,05	−0,20	−0,57
	ζ_3	−0,90	−0,37	0,00	0,22	0,37	0,38

Okomiti sastavci (T - komadi) kružnog ili kvadratnog presjeka A

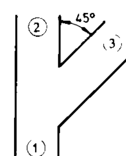
Protok	ζ za oštre rubove	
	$A_1 = A_2 = A_3$	$A_2 = A_3 = 0{,}5\,A_1$
od 2 prema 3; 1 zatv.	0,50	0,50
od 1 prema 2 i 3*	1,00	1,90
od 1 prema 2; 3 zatv.*	1,40	3,70
smanjenje ζ pri zaobljenju (r) za	≈20 %	≈60 %



* ζ vredi za brzinu v u dovodu 1.

Kosi cijevni priključci (45°) kružnog presjeka, površine A pri sastavljanju odnosno razdvajanju tokova (približne vrijednosti):

Protok	ζ
	$A_1 = A_2 = A_3$
od 1 prema 2; 3 zatv.	0,15
od 2 prema 1; 3 zatv.	0,05
od 1 prema 3; 2 zatv.	0,50
od 3 prema 1; 2 zatv.	0,50
od 2 prema 3; 1 zatv.	3,0
od 3 prema 2; 1 zatv.	3,0

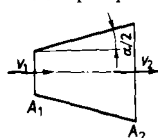


P r o m j e n e   p r e s j e k a od površine A_1 na površinu A_2

Prijelaz okruglog presjeka u kvadratni (ili obrnuto) jednake površine $\zeta = 0{,}1 \ldots 0{,}2$.

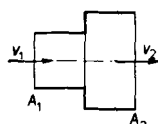
Postupno proširenje (difuzor) za kut proširenja $\alpha = 8 \ldots 14°$

$\zeta_1 = (0{,}2 \ldots 0{,}4)\,[1 - (A_1/A_2)^2]$



Gubitak se odnosi na brzinu v_1.

A_2/A_1	$\alpha = 10 \ldots 15°$	$20 \ldots 30°$
$1{,}25 \ldots 1{,}75$	$\zeta_1 =$ 0,05	0,15
$2{,}00 \ldots 2{,}50$	0,10	0,30

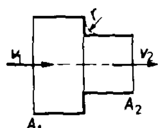


Naglo proširenje $\zeta_1 = (1 - A_1/A_2)^2$

A_1/A_2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ζ_1	1,00	0,64	0,36	0,16	0,04	0,00

Gubitak se odnosi na brzinu v_1.

Postupno suženje (konfuzor) za kutove suženja α do 45°: $\zeta = 0$



Naglo suženje za oštre rubove

A_2/A_1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ζ_1	9,4	1,8	0,9	0,34	0,25	0,16	0,10

Gubitak se odnosi na brzinu v_1.
Za pravilna zaobljenja (r) je: $\zeta \approx 0{,}05$.

P r i g u š n i c e   i   s a p n i c e (vidi str. 155)

Gubici u prigušnici ili sapnici ovise o omjeru površine njezina otvora A_1 i površine cijevi A_2, a odnose se na brzinu u cijevi v

Prigušnice	$m = A_1/A_2$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	
	ζ	249	102	53	31	19	9	4	
Sapnice	$m = A_1/A_2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	ζ	81	16	5,4	2,25	1,0	0,44	0,18	0,06
Venturijeve sapnice	$m = A_1/A_2$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	
	ζ	17	7	3	2	1	0,5	0,3	

A r m a t u r e	ζ
Normalni ventili	3,9
Poboljšani ventili	2,5 ... 3,4
Ventili s nesmetanim prolazom (eliptični presjek)	0,6
Zaklopke (leptiraste) — otvorene	0,2
Zasuni (pravilno izvedeni) — otvoreni	0,05

Otpori gibanja u fluidu

Otpor gibanja tijela u fluidu (aerodinamički otpor) iznosi

$$F_r = C_r A\, p_k$$

gdje znače: C_r – koeficijent otpora (bezdimenzijski broj), A – površinu projekcije tijela na ravninu okomitu na smjer gibanja, p_k – kinetički tlak.

Kinetični tlak pri gibanju tijela relativnom brzinom v u fluidu gustoće ϱ iznosi

$$p_k = \varrho v^2/2$$

Koeficienti otpora C_r

Predmet*			C_r
kružna ploča		–	1,11
2 kružne ploče		$l/d = 1$ 1,5 2 3	0,93 0,78 1,04 1,52
kugla		$Re > (1{,}5 \ldots 4)\,10^5$ $Re < (1{,}5 \ldots 4)\,10^5$	0,09 ... 0,18 0,47
polukugla-konveksna		bez dna s dnom	0,34 0,4
polukugla-konkavna		bez dna s dnom	1,33 1,17
valjak		$Re < 9 \cdot 10^4$; $l/d =$ 1 2 5 10 40 ∞	0,63 0,68 0,74 0,82 0,98 1,20
		$Re > 5 \cdot 10^5$; $l/d = \infty$	0,35
aerodinamički profil		$Re > 10^5$ $l/d =$ 2 3 5 10 20	0,2 0,1 0,06 0,083 0,094

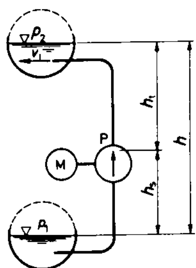
* Strelica na skici pokazuje smjer djelovanja otpora – suprotno smjeru relativne brzine tijela u fluidu.

HIDRAULIČKI STROJEVI

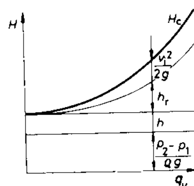
SISALJKE (PUMPE, CRPKE)

Sisaljke služe za prenos kapljevina s nižega na viši položaj ili s nižega na viši tlak ili za oboje. Kadšto služe i tome da – posebnim uređajem (mlaznicom) – postignemo znatniju izlaznu brzinu iz cijevi (npr. štrcaljke).

Dobavna visina (napor)



P – *sisaljka*
M – *pogonski stroj*



Sisaljke povećavaju specifičnu engergiju e (J/kg) kapljevine gustoće ϱ, od ulaza u sisaljku do izlaza iz nje. To povećanje energije redovno izražavamo visinom stupca crpljene kapljevine, a nazivamo je d o b a v n o m   v i s i n o m H

$$H = \frac{e}{g}$$

(g – zemljino ubrzanje)

Potrebnu dobavnu visinu H određujemo karakteristikom priključenoga cijevnoga sistema H_c

$$H = H_c = \frac{p_2 - p_1}{\varrho g} + h + h_r + \frac{v_i^2}{2g}$$

gdje su: p_1 i p_2 – tlakovi u usisnoj i tlačnoj posudi; $h = h_s + h_t$ – ukupna geodetska (usisna i tlačna) visina, h_r – gubici u cijevnom sistemu; v_i – izlazna brzina. (Ulazna je brzina zanemarena, dok je izlazna brzina katkad znatna, npr. pri štrcaljkama.)

Karakteristika cijevnog sistema mijenja se s protokom.

Povećanje specifične energije u sisaljci iznosi

$$e = gH = \frac{p_2 - p_1}{\varrho} + g(h + h_r) + \frac{v_i^2}{2}$$

Ako su tlakovi p_1 i p_2 jednaki zračnome p_a ($p_1 = p_2 = p_a$) – kao npr. pri štrcaljkama – vrijedi

$$e = g(h + h_r) + \frac{v_i^2}{2}$$

Kad je izlazna brzina malena, zanemarujemo zadnji član.

Dopuštena usisna visina (geodetska) $h_{s\,dop}$ za kapljevine gustoće ϱ ovisi o tlaku p_1 (apsolutnom) u donjoj (usisnoj) posudi, tlaku p_T zasićene pare pri temperaturi tekućine T, gubicima u usisnoj cijevi h_{rs} i o posebnim gubicima h_p sisaljke (ovisnim o vrsti sisaljke)

$$h_{s\,dop} \leqq \frac{p_1 - p_T}{\varrho g} - h_{rs} - h_p$$

Ako je donja posuda otvorena ($p_1 = p_a$), dopuštena geodetska usisna visina ovisi o zračnom tlaku p_a, koji se mijenja s nadmorskom visinom.

Za vodu su tlačne visine zraka $h_a (= p_a/\varrho g)$ — u ovisnosti o nadmorskoj visini:

nadmorska visina	0	100	300	500	1000	2500 m
h_a	10,3	10,2	9,9	9,7	9,2	7,7 m

Tlak zasićene pare p_T ovisi o vrsti kapljevine i njenoj temperaturi T.

Kod vode je tlačna visina zasićene pare $h_T (= p_T/\varrho g)$ — u ovisnosti o temperaturi T:

T	5	10	20	50	80	100 °C
h_T	0,09	0,12	0,24	1,26	4,83	10,33 m

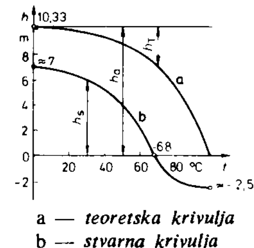
Gubitak tlaka u usisnoj cijevi računamo prema Darcyju (str. 141).

Posebni gubici u sisaljci su ovisni:

— pri stapnim sisaljkama od otvaranja usisnog ventila i utjecaja usisnog vjetrenika,
— pri turbopumpama od pojave kavitacije.

U dijagramu (desno) prikazana je usisna visina vode na površini mora u ovisnosti od temperature vode.

Zbog navedenih utjecaja ne može geodetska usisna visina h_s u vode s temperaturom od 15 °C biti veća od 7 m, dok pri temperaturi od 70 °C voda mora sisaljki pritjecati. Lako hlapive kapljevine moraju uvijek pritjecati sisaljki. (Kod benzina, npr. time sprječavamo nastajanje lako upaljivih para!)



a — *teoretska krivulja*
b — *stvarna krivulja*

Snagu, potrebnu za pogon sisaljke proračunavamo na temelju prirasta specifične energije e odn. dobavne visine H. Za kapljevinu gustoće ϱ pri masenom protoku q_m odnosno volumenskom protoku q_V iznosi:

teoretska snaga $P_0 = q_m e = q_m g H = q_V \varrho g H$

unutarnja snaga $P_i = \dfrac{P_0}{\eta_i}$

efektivna snaga $P = \dfrac{P_i}{\eta_m} = \dfrac{P_0}{\eta_i \eta_m}$

$$P = \frac{P_0}{\eta} = \frac{q_m e}{\eta} = \frac{q_m g H}{\eta} = \frac{q_V \varrho g H}{\eta},$$

gdje su: η_i – unutarnja korisnost, η_m – mehanička korisnost, η – efektivna korisnost, koja iznosi

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_m$$

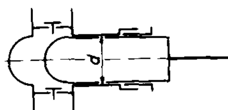
Korisnosti za različite vrste sisaljki i ventilatora iznose:

	η_i	η_m	η
stapne sisaljke	0,90 . . . 0,95	0,88 . . . 0,95	0,80 . . . 0,90
turbopumpe	0,55 . . . 0,90	0,95	0,60 . . . 0,85
ventilatori	–	–	0,50 . . . 0,90

Te korisnosti vrijede za najpovoljnije pogonske uvjete. Pri promenljivim uvjetima djelovanja (promjenljiv protok, promjenljiva dobavna visina ili brzina vrtnje) korisnosti se mijenjaju, i to osobito znatno kod turbopumpi (vidi str. 152).

Stapne sisaljke

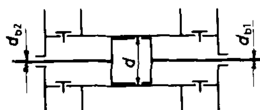
Stapne su sisaljke izgubile svoj nekadašnji značaj (male brzine), ali se upotrebljavaju i nadalje za male dobave ili veoma visoke tlakove.



Volumenski protok iznosi teoretski:

– kod jednoradnih stapnih sisaljki promjera cilindra d, stapaja s i brzine vrtnje n

$$q_{V0} = \frac{\pi d^2}{4} s n$$



– kod dvoradnih sisaljki s promjerima stapajice d_{b1} i d_{b2}

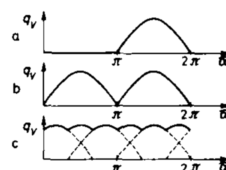
$$q_{V0} = \frac{\pi}{4}(2d^2 - d_{b1}^2 - d_{b2}^2) s n$$

Dobava sisaljke, tj. stvarni volumenski protok q_V, iznosi zbog volumetrijskih gubitaka (kod stapa, ventila itd.) samo

$$q_V = \lambda q_{V0},$$

gdje je stupanj dobave $\lambda = 0{,}93 \ldots 0{,}98$.

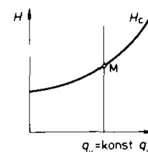
Dobava q_V je kod stapnih sisaljki nejednolika. Ona se mijenja već prema položaju (kutu α) osnaca stapnog mehanizma.



Dobava q_V odgovara, prema sl. a, jednoradnoj stapnoj sisaljci; prema sl. b dvoradnoj, odnosno jednoradnoj, ali sa 2 cilindra (s osnacima pod kutom od 180°).

Nejednolikost stapnih sisaljki ublažava se vjetrenicima (zračnim komorama) ili većim brojem cilindara (npr. kod triju cilindara su osnaci međusobno razmaknuti za 120°, sl. c).

Vjetrenici na usisnoj strani povećavaju usisnu visinu, a na tlačnoj strani su zaštita protiv hidrauličkog udara.



M – *radna točka*

Brzina vrtnje stapnih pumpi iznosi 0,75 . . . 4,7 okr./s (= 45 . . . 280 okr./min).

Pri konstantnoj brzini vrtnje (i nepromijenjenom stapaju) bit će dobava konstantna.

Usisna visina h_s računa se pri stapnim pumpama do tlačnog ventila i iznosi:

– pri pumpama s usisnim vjetrenikom

$$h_{s\,dop} \leqq \frac{p_1 - p_T}{\varrho g} - h_{rs} - h_v$$

gdje su: h_{rs} – gubitak visine u usisnoj cijevi; h_v – gubitak visine pri otvaranju usisnog ventila ($\approx$ 2 m);
– pri pumpama bez usisnog vjetrenika

$$h_{s\,dop} \leqq \frac{p_1 - p_T}{\varrho g} - \left(h_v + a n^2 r l_s \frac{A}{A_s}\right)$$

gdje su: a = 4,82 s²/m, n – brzina vrtnje (okr./s), r – radij osnaca, l_s – duljina usisne cijevi, A – korisni presjek cilindra pumpe, A_s – presjek usisne cijevi.

Turbopumpe

Turbopumpe su skupno ime za radijalne i aksijalne (rotacijske) pumpe koje djeluju po Eulerovim zakonima za turbostrojeve.

U praksi se često sve turbopumpe (radijalne i aksijalne) nepravilno nazivaju »centrifugalnim« pumpama, iako su zapravo samo radijalne pumpe centrifugalne.

Brzohodnost (specifična brzina vrtnje) n_q

$$n_q = \frac{n}{\sqrt{H}} \sqrt{\frac{q_V}{\sqrt{H}}}$$

pokazuje koju bi brzinu vrtnje morala imati geometrijski slična pumpa, izvedena za dobavnu visinu H (m), protok (dobavu) q_V (m^3/s) i brzinu vrtnje n, da bi pri dobavnoj visini $H_1 = 1$ m dobavljala $q_{V1} = 1\ m^3/s$. (Prividna nekoherentnost veličina u toj jednadžbi otpada, ako pod simbolima H i q_V razumijevamo bezdimenzijske omjere H/H_1 i q_V/q_{V1}.)

Sve geometrijski slične turbopumpe koje imaju slične protočne uvjete (geometrijski slične trokute brzina) imaju i jednaku brzohodnost. Ona iznosi za različite turbopumpe:

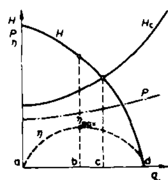
radijalne	$n_q = 0{,}23 \ldots 1{,}7$ okr/s	$= 14 \ldots 100$ okr/min
aksijalne (propelerne)	$n_q = 1{,}7 \ldots 10$ okr/s	$= 100 \ldots 600$ okr/min

Manjoj brzohodnosti n_q odgovara manja brzina vrtnje, manji protok i veća dobavna visina.

Za visokotlačne sisaljke kojima je brzohodnost $n_q < 0{,}23$ okr/s (odn. < 14 okr/min), izabiremo sisaljke s više stupnjeva.

Karakteristike turbopumpi (i ventilatora)

Pri konstantnoj brzini vrtnje n dobavna visina H, korisnost η i snaga P potrebna za pogon sisaljke ovise o dobavi q_V (koju možemo mijenjati prigušivanjem).



U dijagramu radijalne sisaljke $H = f(q_V)$ odgovaraju točke:

- a – radu pri potpuno zatvorenom izlaznom otvoru ($q_V = 0$); sva se snaga pretvara u toplinu (porast temperature kapljevine!);
- b – radu pri optimalnim uvjetima (η_{max});
- c – stvarnom radu pri priključku pumpe na cjevovod ($H = H_c$);
- d – radu na prazno ($H = 0$; samo teoretski!).

Pri promjeni brzine vrtnje od n_1 na n_2 mijenjaju se za jednu te istu sisaljku protok q_V, dobavna visina H i snaga P po zakonu afiniteta

$$\frac{q_{V1}}{q_{V2}} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad \frac{P_1}{P_2} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Usisna visina h_s je vertikalna udaljenost osi pumpe (pri ulaznoj površini rotora) od površine kapljevine u usisnoj posudi (crpilištu).

Dopuštena usisna visina iznosi

$$h_{s\,dop} \leqq \frac{p_1 - p_T}{\varrho g} - h_{rs} - \sigma H$$

gdje je kavitacijski koeficijent σ za pumpe (po Stepanovu) ovisan o brzohodnosti n_q (okr./s)

$$\sigma \approx 0{,}287\, n_q^{4/3}$$

(Prividna nesuvislost u toj jednadžbi ne postoji, ako pod n_q razumijevamo bezdimenzijski omjer n_q/n_1, pri čemu je $n_1 = 1$ okr./s)

Turbopumpne redovno ne mogu same usisati tekućinu, već se mora usisna cijev napuniti tekućinom. Da bi usisna cijev i za vrijeme pogonskog prekida ostala napunjena tekućinom, ugrađuje se na njezinu dnu odbojni (»nožni«) ventil ili zaklopka. – Ima, međutim, i tzv. samousisnih sisaljki u kojih je prigrađen poseban uređaj da mogu usisati tekućinu i kad je usisna cijev napunjena zrakom.

Ventilatori

Ventilatori služe za transport plinova i para pa su zapravo sisaljke za plinove i pare u području njihove nestlačivosti.

Kao turbostrojevi, oni se pokoravaju istim zakonima kojima i turbopumpe, samo što prirast specifične energije e, odnosno dobavnu visinu H izraženu u stupcu fluida, obično izražavamo prirastom (»skokom«) tlaka (»naporom«) Δp

$$\Delta p = e\,\varrho = H\,\varrho g$$

gdje je ϱ – gustoća dobavnog fluida.

Karakteristika cjevovoda Δp_c ($= H_c \varrho g$) načelno je jednaka onoj za pumpe s razlikom što – zbog male gustoće plinova – ne uzimamo u obzir geodetsku visinu h

$$\Delta p_c = p_2 - p_1 + \Delta p_r + \varrho \frac{v_i^2}{2}$$

Ventilatore dijelimo također prema brzohodnosti na:

radijalne	$n_q = 0{,}1 \ldots 1{,}67$ okr./s	$= 6 \ldots 100$ okr./min
aksijalne (propelerne)	$n_q = 1{,}17 \ldots 10$ okr./s	$= 70 \ldots 600$ okr./min

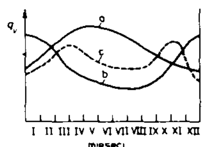
Karakteristike ventilatora u načelu su slične karakteristikama turbopumpi (vidi str. 152).

Vodna snaga P_0 dana je raspoloživim protokom vodne mase q_m ili volumenskim protokom q_V i korisnim padom H

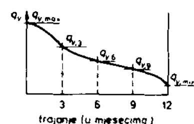
$$P_0 = q_m g H = q_V \varrho g H$$

gde je ϱ gustoća vode.

Protok je ovisan o karakteristici rijeke kojoj pripada određeno oborinsko područje. Visokogorske rijeke (»a« — npr. Drava) imaju najveći protok u kasno proljeće i rano ljeto, kad se u visokim planinama tope ledenjaci. Primorske rijeke (»b« — npr. Neretva) imaju najveći protok u doba zimskih kiša. Srednjogorske rijeke (»c« — npr. Sava) imaju po dva maksimuma — u proljeće i ujesen.



Protok je, osim toga, ovisan o vlažnosti godine (sušne i vlažne godine). Pri ocjenjivanju protoka uzimamo u obzir njegov prosjek kroz duži niz godina (npr. 35 godina).



Radi prosuđivanja rentabilnosti postrojenja i izbora turbine ustanovljujemo osim najvećeg i najmanjeg protoka ($q_{V,max}$ i $q_{V,min}$) još i protoke koji godišnje traju (ukupno) 3 mjeseca ($q_{V,3}$), 6 mjeseci ($q_{V,6}$) ili 9 mjeseci ($q_{V,9}$).

Nejednolikost protoka izravnavamo akumulacijom vode u vrijeme većeg protoka odnosno manjeg potroška. Akumulacija može biti dnevna ili tjedna (brane) ili godišnja (dolinske brane). U posebnim slučajevima viškom energije u vrijeme malog opterećenja crpimo vodu u visoko smještene akumulacijske bazene, da je odatle u vrijeme vršnog opterećenja iskorištavamo.

Korisni pad H ovisi o geodetskom padu h (tj. o razlici vodenih razina na najvišem mjestu i na izlazu iz turbinskog postrojenja) te o gubicima h_r u dovodu (cjevovod, armature itd.)

$$H \approx h - h_r$$

Točno određivanje raspoloživog pada H je — za razne vrste turbinskih postrojenja — definirano u međunarodnim propisima za primopredaju vodnih turbina.

Geodetski pad h mijenja se s promjenom protoka. Povećani protok izaziva porast vodenih razina, a osobito razine na izlazu, zbog čega se smanjuje geodetski pad. Pri razmjerno malom padu njegovo je smanjenje vrlo osjetljivo i može unatoč povećanom protoku prouzročiti smanjenje vodne snage P_0.

Snaga turbine

Teoretska snaga P_0 turbine jednaka je raspoloživoj vodnoj snazi

$$P_0 = q_m e = q_m g H = q_V \varrho g H$$

gdje q_m, odnosno q_V znači maseni odnosno volumenski protok kroz turbinu.

Unutarnja snaga P_i smanjena je za unutarnje gubitke koje uzimamo u obzir unutarnjom korisnošću η_i

$$P_i = \eta_i P_0$$

Unutarnja korisnost turbina (umnožak hidrauličke korisnosti η_h i volumetrijske korisnosti η_v; $\eta_i = \eta_h \eta_v$) jako ovisi o njenoj brzini vrtnje pa je dobra samo pri određenim brzinama vrtnje (n'), za koje su izvedene turbinske lopatice.

Efektivna snaga P smanjena je još za mehaničke gubitke (uključivši gubitke za pogon pomoćnih uređaja, regulatora itd.), što uzimamo u obzir mehaničkom korisnošću η_m odnosno efektivnom korisnošću $\eta = \eta_i \eta_m$

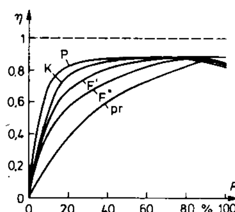
$$P = \eta_m P_i = \eta P_0 \qquad P = \eta q_m e = \eta q_m g H = \eta q_V \varrho g H$$

Efektivna korisnost turbina iznosi:

za manje turbine	$\eta = 0{,}75 \ldots 0{,}85$
za veće turbine	$\eta = 0{,}85 \ldots 0{,}95$

Efektivna korisnost ovisi o promjeni opterećenja P, i to različito za različite turbine s raznovrsnim sistemima regulacije. Ovisnost $\eta = f(P)$ pri konstantnoj brzini vrtnje n prikazana je dijagramom u kojem krivulje znače:

- P – peltonove turbine
- F′ – sporohodne francisove turbine
- F″ – brzohodne francisove turbine
- pr – propelerne turbine
- K – kaplanove turbine



Brzohodnost turbina (specifična brzina vrtnje) n_q

$$n_q = \frac{n}{\sqrt{H}} \sqrt{\frac{q_V}{\sqrt{H}}}$$

pokazuje kakvu bi brzinu vrtnje morala imati geometrijski slična turbina, građena za korisni pad H(m), protok q_V (m³/s) i brzinu vrtnje n, da bi pri korisnom padu $H_1 = 1$ m gutala količinu vode $q_{V1} = 1$ m³/s.

(Koherentnost veličina nije narušena ni ovdje ako pod simbolima H i q_V razumijevamo bezdimenzijske omjere H_1/H i q_V/q_{V1}.)

Ima li turbina više (i) sapnica (kod peltonovih turbina) ili više rotora na istoj osovini (kod peltonovih i francisovih turbina), bit će brzohodnost

$$n_{qi} = n_q \sqrt{i}$$

Geometrijski slične vodne turbine imaju, uz slične protočne uvjete (slične »trokute brzina«), istu brzohodnost n_q.

Vodne turbine za velike padove imaju manju brzohodnost, a one za manje padove veću brzohodnost.

Područja upotrebljivosti pojedinih vrsta vodnih turbina:

Vrste turbina	H m	n_q okr./s	n_q okr./min
Peltonove – s jednom sap.	2000...100	0,02...0,16	1,2...9,5
– s više sapnica		0,08...0,37	5...22
Francisove – sporohodne	500...105	0,33...0,75	20...45
– normalne	105... 55	0,75...1,17	45...70
– brzohodne	55... 35	1,17...1,67	70...100
Propelerne / Kaplanove	35... 5	1,67...5,80	100...350

Izbor turbine ograničen je kavitacijom. Brzohodnost n_q određuje se (na temelju dijagrama ispitivanja) u ovisnosti o minimalnom dopuštenom koeficijentu kavitacije σ_{min} (Thominog broja)

$$n_q = f(\sigma_{min}) \qquad \sigma_{min} \approx (p_a/\varrho g - h_d)/H$$

gdje su: p_a – zračni tlak, h_d – visina difuzora.

B r z i n a v r t n j e vodnih turbina prilagođuje se traženoj brzini vrtnje gonjenih strojeva. Redovno su to električni generatori koji imaju određenu brzinu vrtnje (vidi str. 266). Turbinu odabiremo tako da ima pri traženoj brzini vrtnje najbolju korisnost η.

Najveća brzina vrtnje n_{max}, koju turbina može postići u slučaju potpunog rasterećenja i potpuno otvorenih privodnih lopatica (»pobjegnuće«) mnogo je veća od normalne brzine vrtnje n i iznosi:

kod peltonovih turbina $n_{maks} = (1{,}8 \dots 1{,}9)n$
kod francisovih turbina $n_{maks} = (1{,}8 \dots 2{,}1)n$
kod kaplanovih turbina $n_{maks} = (2{,}3 \dots 3{,}0)n$

Pri normalnom se radu brzina vrtnje turbine po pravilu ne smije povećati više od 10%. Regulator koji pravilno djeluje mora spriječiti da se pri normalnom radu vrtnje turbine poveća iznad dopuštene vrijednosti. Međutim, svi rotirajući dijelovi turbine i priključenih strojeva moraju – radi sigurnosti u slučaju greške na regulatoru – izdržati i najveću brzinu vrtnje n_{max}.

TOPLINA

Specifični toplinski kapacitet

Toplina dQ mijenja tijelu mase m temperaturu za dT

$$dQ = c m dT$$

c je specifični toplinski kapacitet tijela (J/kgK). U idealnih je plinova – u najpriprostijem slučaju – konstantna, inače općenito ovisi o temperaturi i o tlaku.

Smatramo li c konstantnim, pišemo

$$Q = c m (T_2 - T_1)$$

Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih tvari razabiru se iz tablica na str. 163 i 212 do 217.

Pri promjenljivom specifičnom kapacitetu računamo katkada s »prosječnim specifičnim kapacitetom« između temperatura T_1 i T_2

$$c_{med} = \int c\, dT / (T_2 - T_1)$$

S prosječnim specifičnim kapacitetom računamo kao da je konstantan.

Entalpija je određena izrazom $H = U + pV$

U tom je izrazu U – unutarnja energija, a pV – vanjska energija (energija prostora, p – tlak, V – volumen).

»Specifična entalpija h« je entalpija jedinice mase s obzirom na – po volji odabrano – ishodište (npr. 0°C), gdje je $h = 0$. Mjerimo je u J/kg. Vrijednosti specifične entalpije za pare složene su u tablicama na str. 169 do 191, a za vlažni zrak na str. 194 do 197.

Temperaturna raztezljivost (dilatacija)

L i n e a r n o t e m p e r a t u r n o r a s t e z a n j e zbog povišenja temperature za dT iznosi $dl = \alpha l_0 dT$

gdje su: α – linearni koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}), l_0 – prvobitna duljina.

Smatramo li da je koeficijent α konstantan, vrijedi

$$l = l_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Koeficijent raztezanja α pri višim temperaturama raste. Njegove su vrijednosti za čvrste tvari dane na str. 158 i 159.

K u b i č n o t e m p e r a t u r n o r a s t e z a n j e zbog povećanja temperature za dT iznosi $dV = \beta V_0 dT$

gdje su: β – kubični koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}), V_0 – prvobitni volumen.

Smatramo li koeficijent β konstantnim, bit će

$$V = V_0[1 + \beta(T - T_0)]$$

I kubični koeficijent rastezanja β pri višim temperaturama raste. Njegove su vrijednosi za tekućine i plinove dane na str. 159.

Linearni koeficijenti temperaturnog rastezanja α (K^{-1})

Temperaturno područje:	0 ... 100 °C	0 ... 500 °C	0 ... 1000 °C
Kovine:			
aluminij	0,000 023 8	0,000 027 4	—
bakar	0,000 016 5	0,000 018 1	—
cink	0,000 016 5	—	—
iridij	0,000 006 5	—	—
kadmij	0,000 036 0	—	—
kobalt	0,000 013 0	—	—
kositar	0,000 026 7	—	—
krom	0,000 008 4	—	—
magnezij	0,000 026 0	0,000 029 8	—
mangan	0,000 022 8	—	—
molibden	0,000 005 2	—	—
nikal	0,000 013 0	0,000 015 2	0,000 016 8
olovo	0,000 029 2	—	—
platina	0,000 009 0	0,000 009 5	0,000 010 2
srebro	0,000 019 7	0,000 020 9	—
volfram	0,000 004 5	0,000 004 5	0,000 004 6
zlato	0,000 014 2	0,000 015 2	—
željezo (čisto)	0,000 012 3	—	—
Slitine:			
bronca (kositrena)	0,000 018 0	—	—
crveni lijev	0,000 019 0	—	—
čelik — neleg. 0,1 % C	0,000 012 0	0,000 014 1	—
0,6 % C	0,000 011 7	0,000 013 8	—
— legir. CrNi	0,000 011 5	—	—
18 Cr 8 Ni	0,000 016 0	—	—
13 % Cr	0,000 010 5	—	—
— invar (36 % Ni)	0,000 001 5	0,000 003 4	—
duralumin	0,000 023 5	0,000 027 3	—
konstantan	0,000 015 2	0,000 016 8	—
manganin	0,000 017 5	0,000 019 4	—
mjed (mesing)	0,000 018 4	—	—
novo srebro	0,000 018 0	—	—
platina-iridij (10 % Ir)	0,000 009 0	0,000 009 5	0,000 010 2
silumin	0,000 022 0	—	—
sivi lijev	0,000 010 4	0,000 012 9	—
tvrdi metali	0,000 005 5	—	—

Linearni koeficijenti temperaturnog rastezanja α (K^{-1})

Temperaturno područje:	0 ... 100 °C	0 ... 500 °C	0 ... 1000 °C
Nekovine:			
beton	0,000 012	—	—
celuloid	0,000 101	—	—
dijamant	0,000 001 3	—	—
grafit	0,000 002	—	—
granit	0,000 006	—	—
korund	0,000 006 4	0,000 007 2	0,000 008 2
magnezija (MgO)	0,000 012 3	0,000 012 6	0,000 013 9
opeka	0,000 008	—	—
poliamidi	0,000 110	—	—
polivinilklorid	0,000 080	—	—
porculan	0,000 003 0	0,000 003 6	0,000 004 3
staklo — jensko	0,000 003 5 ...	0,000 004 0 ...	—
	... 0,000 008 1	... 0,000 009 3	—
— kremeno	0,000 000 5	0,000 000 6	0,000 000 5
sumpor	0,000 090	—	—

Kubični koeficijenti temperaturnog rastezanja β (K^{-1})

Kapljevina	β	Kapljevina	β
voda 0 °C	—0,000 060	benzin	0,001 200
10 °C	0,000 200	benzen (benzol)	0,000 106
20 °C	0,000 380	etanol (alkohol)	0,001 150
60 °C	0,000 540	ulje za mazanje	0,000 740
100 °C	0,000 780	pentan	0,000 160
200 °C	0,000 550	propantriol (glicerin)	0,000 520
		terpentinsko ulje	0,000 097
		transformatorsko ulje	0,000 690
		živa	0,000 180

Plin	β	Plin	β
amonijak	0,003 802	ugljični dioksid	0,003 726
argon	0,003 676	ugljični monoksid	0,003 670
dušik	0,003 674	vodik	0,003 662
helij	0,003 660	sumporni dioksid	0,003 850
kisik	0,003 674	idealni plin	0,003 661 = = 1/273,15
neon	0,003 661		

OSNOVNI ZAKONI TERMODINAMIKE

Prvi glavni zakon termodinamike

»Toplina je ekvivalentna mehaničkom radu.« (Mayer, 1842; Joule, 1843.)

Dovođenje ili odvođenje topline Q uzrokuje promjenu unutarnje energije U i apsolutnog rada A (dobivenoga ili utrošenoga), odnosno promjenu entalpije H i tehničkog rada W (dobivenoga ili utrošenoga):

$$dQ = dU + dA \qquad +dQ = \text{dovedena toplina}$$
$$dQ = dH + dW \qquad -dQ = \text{odvedena toplina}$$

Za slučaj mehaničke ravnoteže možemo rad izraziti tlakom p i volumenom V

$$dA = p dV \qquad +dA,\ +dW = \text{dobiveni rad}$$
$$dW = -V dp \qquad -dA,\ -dW = \text{utrošeni rad}$$

Entalpijski teorem: $H_2 - H_1 = Q - W$

Drugi glavni zakon termodinamike

»Toplina ne prelazi nikada sama od sebe s hladnijega na toplije tijelo.« (Clausius, 1850; Thomson, 1851.)

Po tome razlikujemo:

a) povrative procese, tj. one koji su mogući u jednom ili drugom smislu, a da pri povratku ne ostane u prirodi nikakav trag (npr. isparivanje i kondenzacija, kompresija i ekspanzija itd.), i

b) nepovrative procese, koji su mogući samo u jednom smislu (npr. prijelaz topline, trenje, prigušivanje, miješanje itd).

Entropija je za sve povrative procese određena izrazom $dS = dQ/T$. U tom je izrazu dQ — promjena topline pri apsolutnoj temperaturi T.

»Specifična entropija s« je entropija jedinice mase računana s obzirom na – po volji odabrano – ishodište (npr. kod 0°C), gdje je $s = 0$. Mjerimo je u J/kgK. Njene vrijednosti za pare dane su na str. 169 do 191.

Entropija se zatvorenog sustava pri svim nepovrativim procesima povećava ($dS > 0$).

Eksergija* E je maksimalni tehnički rad što ga s obzirom na stanje okoline (pri temperaturi T_0 i tlaku p_0) možemo dobiti iz unutarnje energije tvari kojoj je entalpija H i entropija S: $E = H - H_0 - T_0(S - S_0)$.
H_0 je entalpija, a S_0 entropija tvari pri stanju okoline (T_0, p_0).

Anergija* $T_0(S - S_0)$ je dio unutarnje energije iz kojega ne možemo dobiti tehnički rad.

»Specifična eksergija e« je eksergija jedinice mase: $e = h - h_0 - T_0(s - s_0)$, gdje su: h – specifična entalpija i s – specifična entropija tvari u promatranom stanju, h_0 i s_0 su specifična entalpija i entropija tvari pri tlaku i temperaturi okoline, »specifična anergija« $b = T_0(s - s_0)$.

---

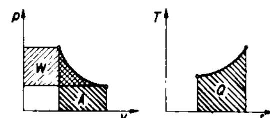
* Te je nazive uveo prof. Z. Rant, Ljubljana (SV 1955/1 i SV 1962/1–2).

Promjene stanja tvari

Pri promjeni stanja određujemo uglavnom: volumen V, tlak p, temperaturu T, apsolutni rad A, odn. tehnički rad W i toplinu Q.

U pV-dijagramu predočeni su: apsolutni rad A površinom ispod krivulje promjene stanja, a tehnički rad W površinom lijevo od te krivulje

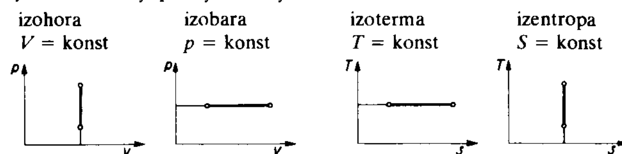
$$A = \int p dV \qquad W = -\int V dp$$



U TS-dijagramu predočena je toplina Q površinom ispod krivulje povrative promjene stanja $Q = \int T dS$

Najkarakterističnije promjene stanja:

izohora	izobara	izoterma	izentropa
V = konst	p = konst	T = konst	S = konst

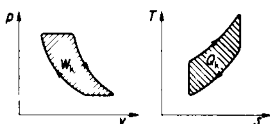


»Adijabata« znači promjenu stanja pri kojoj toplinu niti (izvana) dovodimo niti je odvodimo, ali ona može biti proizvedena u samom sistemu zbog Izentalpa: H = konst. U idealnom su slučaju (bez gubitaka) adijabata i izentropa identične.

Kružni procesi

U idealnom (bez gubitaka i sl.) desnokretnom kružnom procesu (tj. u smislu kazaljke na satu, vidi sliku!), koji odgovara procesu pogonskih strojeva, površine omeđene zatvorenom krivuljom povrative promjene stanja predstavljaju: u pV-dijagramu dobiveni rad W_k, u TS-dijagramu razliku toplina Q_k:

$$W_k = Q_k = Q - Q_0$$



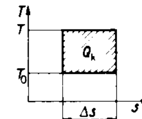
gdje je Q dovedena, a Q_0 odvedena toplina ($Q > Q_0$).

Energetska korisnost kružnog procesa je $\eta_k = W_k/Q = 1 - Q_0/Q$

U lijevokretnom kružnom procesu (protivnom smislu u slici), koji odgovara procesu toplinskih pumpi, negativni su i rad $-W_k$ (utrošeni) i razlika toplina $-Q_k$ (dobivena) ($Q < Q_0$).

Carnotov kružni proces teče između dviju izentropa i dviju izoterma. Za nj vrijedi

$$Q_k = (T - T_0)\Delta S$$



a energetska koristnost iznosi

$$\eta = 1 - T_0/T \quad \text{(Thomsonova jednadžba)}$$

IDEALNI PLINOVI

Pod »idealnim plinovima« razumijevamo tako visoko pregrijane pare da se pokoravaju zakonu Boyleovu i Mariotteovu (pV = konst pri T = konst) te Gay-Lussacovu (V/T = konst pri p = konst). U prirodi nema idealnih plinova, no mnogi se realni plinovi po svojim svojstvima tako približuju idealnim plinovima da za njih vrijede s dovoljnom točnošću navedeni zakoni.

Tehnički osobito važni realni plinovi jesu:

jednoatomni He, Ar
dvoatomni H_2, N_2, O_2, CO, zrak
višeatomni CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6.

Pri malom tlaku i pogotovu još pri visokoj temperaturi možemo zakone idealnih plinova primijeniti i na H_2O, CO_2, SO_2, NH_3 itd.

J e d n a d ž b a s t a n j a p l i n a povezuje tlak p, gustoću ϱ, odnosno specifični volumen v ili volumen V te masu m i temperaturu T:

$$p/\varrho = RT \qquad pv = RT \qquad pV = mRT$$

R = *plinska konstanta*, koja ovisi samo o sastavu plina. Mjerimo je u J/kgK. Vrijednosti za R – vidi str. 163.

Opća plinska konstanta (umnožak molne mase m_m i plinske konstante R) jednaka je za sve plinove i iznosi

$$R_m = m_m R = 8314{,}34\,\text{J/kmol K}$$

A v o g a d r o v z a k o n

1 kmol bilo kojeg (idealnog) plina zauzima pri jednakom stanju uvijek isti volumen V_m, koji pri 0°C i tlaku 1,01325 bar iznosi

$$V_m = R_m T/p = 22{,}4136\,\text{m}^3/\text{kmol}$$

Prema tome vrijedi za sve plinove (molne mase m_m i gustoće ϱ) $V_m = m_m/\varrho$, a za plinove među sobom $m_{m1}/m_{m2} = \varrho_1/\varrho_2$.

S p e c i f i č n i t o p l i n s k i k a p a c i t e t p l i n o v a

izobarski – pri konstantnom tlaku $c_p = dh/dT$
izovolumetrički – pri konstantnom volumenu $c_v = du/dT$

gdje su: dh – promjena specifične entalpije, du – promjena specifične unutarnje energije ($u = U/m$), dT – promjena temperature.

Omjer specifičnih toplinskih kapaciteta $\varkappa = c_p/c_v$
Razlika specifičnih toplinskih kapaciteta $c_p - c_v = R$
$c_p = \varkappa R/(\varkappa - 1)$ $\qquad c_v = R/(\varkappa - 1)$

E n t a l p i j a p l i n o v a

specifična entalpija $h = \int c_p\, dT + C$
molna entalpija $h_m = m_m \int c_p\, dT + C$

Podaci o molnoj entalpiji h_m najpoznatijih plinova nalaze se na str. 164. Iz molne se entalpije vrlo lako može izračunati specifična entalpija $h = h_m/m_m$.

Toplinska svojstva plinova

Vrelište i kritično stanje plinova

Plin	Kem. simbol	Vrelište (pri 1,01325 bar)		Veličine kritičnog stanja			
				temperatura		tlak	gust.
		t_v °C	T_v K	t_k °C	T_k K	p_k bar	ϱ kg/m³
helij	He	−268,9	4,3	−267,9	5,3	2,28	69
argon	Ar	−185,9	87,3	−122,4	150,8	48,7	531
vodik	H_2	−252,8	20,4	−239,3	33,3	13,0	31
dušik	N_2	−195,8	77,4	−147,1	126,1	33,9	311
kisik	O_2	−183,0	90,2	−118,8	154,4	50,4	430
zrak	–	−194,0	79,2	−140,7	132,5	37,7	310
uglj. monoks.	CO	−191,5	81,7	−140,2	133,0	34,9	301
uglj. dioksid	CO_2	−78,5	194,7	+31,0	304,2	73,6	460
sump. dioksid	SO_2	−10,0	263,2	+157,3	430,5	78,9	524
amonijak	NH_3	−33,4	289,8	+132,4	405,6	113,0	235
etin (acetilen)	C_2H_2	−83,6	189,6	+35,7	308,9	63,5	231
metan	CH_4	−161,7	111,5	−83,0	190,7	46,3	162
monoklormetan	CH_3Cl	−24,0	249,2	+143,1	416,3	66,8	370
difluordiklormetan	CF_2Cl_2	−30,0	243,2	+111,5	384,7	40,1	555
eten (etilen)	C_2H_4	−103,5	169,7	+9,3	282,5	51,4	216
etan	C_2H_6	−88,6	184,6	+35,0	308,2	49,6	210

Plinska konstanta, specifični toplinski kapacitet, gustoća

Plin	Broj atoma u molekuli	Molna masa m_m kg/kmol	Plinska konstanta R J/kgK	Specifična topl. kap. c_p J/kgK	$\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ *	Gustoća** ϱ_0 kg/m³
He	1	4,003	2078	5237	1,66	0,1785
Ar	1	39,94	208,2	523	1,66	1,7834
H_2	2	2,016	4122	14245	1,41	0,0899
N_2	2	28,02	296,7	1038	1,40	1,2505
O_2	2	32,00	259,8	913	1,40	1,4290
zrak	–	28,96	287,0	1005	1,40	1,2928
CO	2	28,01	296,9	1042	1,40	1,2500
CO_2	3	44,01	188,8	820	1,30	1,9768
SO_2	3	64,06	129,8	607	1,27	2,9265
NH_3	4	17,03	488,2	2055	1,31	0,7713
C_2H_2	4	26,04	319,6	1511	1,26	1,1709
CH_4	5	16,04	518,7	2156	1,32	0,7168
CH_3Cl	5	50,49	164,7	737	1,29	2,3084
CF_2Cl_2	5	120,9	68,8	561	1,14	5,0830
C_2H_4	6	28,05	296,7	1612	1,25	1,2604
C_2H_6	8	30,07	276,7	1729	1,20	1,3560

* Pri 0°C. – ** Pri 0 °C i 1,01325 bar.

Molna entalpija h_m plinova
pri konstantnom tlaku $p = 0$ (bez obzira na disocijaciju)

Temperatura t °C	Temperatura T K	h_m kJ/kmol H_2	h_m kJ/kmol N_2	h_m kJ/kmol O_2	h_m kJ/kmol Zrak
0	273	0	0	0	0
100	373	2 897	2 918	2 951	2 913
200	473	5 819	5 860	5 982	5 865
300	573	8 765	8 845	9 113	8 858
400	673	11 690	11 880	12 360	11 920
500	773	14 630	14 970	15 680	15 040
600	873	17 610	18 110	19 070	18 260
700	973	20 620	21 320	22 520	21 480
800	1073	23 630	24 610	26 030	24 830
900	1173	26 690	27 960	29 570	28 210
1000	1273	29 790	31 360	33 150	31 620
1100	1373	32 970	34 790	36 750	35 080
1200	1473	36 140	38 260	40 390	38 570
1300	1573	39 380	41 760	44 040	42 070
1400	1673	42 660	45 290	47 720	45 630
1500	1773	45 960	48 810	51 450	49 190
1750	2023	54 380	57 770	60 860	58 190
2000	2273	63 040	66 810	70 410	67 330
2500	2773	80 960	85 190	89 890	85 330
3000	3273	99 500	103 730	109 900	104 600

Temperatura t °C	Temperatura T K	h_m kJ/kmol CO	h_m kJ/kmol CO_2	h_m kJ/kmol SO_2	h_m kJ/kmol H_2O
0	273	0	0	0	0
100	373	2 918	3 839	4 077	3 361
200	473	5 860	8 079	8 498	6 798
300	573	8 866	12 630	13 210	10 320
400	673	11 920	17 410	18 150	13 960
500	773	15 050	22 500	23 250	17 730
600	873	18 260	27 700	28 510	21 600
700	973	21 520	33 060	33 840	25 610
800	1073	24 870	38 490	39 250	29 770
900	1173	28 250	44 080	44 750	34 060
1000	1273	31 690	49 690	50 270	38 340
1100	1373	35 170	55 460	55 840	42 900
1200	1473	38 690	61 240	61 450	47 470
1300	1573	42 240	67 060	67 100	52 130
1400	1673	45 750	72 920	72 710	56 970
1500	1773	49 310	78 860	78 360	61 790
1750	2023	58 310	93 720	94 810	74 340
2000	2273	67 440	100 400	106 900	87 150
2500	2773	85 940	139 100	139 000	113 800
3000	3273	104 500	169 700	164 500	141 000

Povrative promjene stanja plinova

Oznake veličina – na str. 157 do 162

a) **Izohora** $V = \text{konst}$ $p/T = \text{konst}\,(= mR/V)$ $p_1/p_2 = T_1/T_2$

Apsolutni rad $A = 0$

Tehnički rad $W = V(p_1 - p_2)$

Toplina $Q = mc_v(T_2 - T_1) = m\dfrac{R}{\kappa - 1}(T_2 - T_1)\dfrac{V}{\kappa - 1}(p_2 - p_1)$

b) **Izobara** $p = \text{konst}$ $V/T = \text{konst}\,(= mR/p)$ (Gay-Lussacov zakon)

$V_1/V_2 = \varrho_2/\varrho_1 = T_1/T_2$

Apsolutni rad $A = p(V_2 - V_1) = mR(T_2 - T_1)$

Tehnički rad $W = 0$

Toplina

$$Q = mc_p(T_2 - T_1) = m\frac{\kappa R}{\kappa - 1}(T_2 - T_1) = \frac{\kappa p}{\kappa - 1}(V_2 - V_1) = \frac{\kappa}{\kappa - 1}A$$

c) **Izoterma** $T = \text{konst}$

$pV = \text{konst}\,(= mRT)$ (Boyleov i Mariotteov zakon)

$p_1V_1 = p_2V_2$

Apsolutni rad $A = p_1V_1 \ln\dfrac{V_2}{V_1} = p_1V_1 \ln\dfrac{p_1}{p_2}$

$= mRT \ln\dfrac{V_2}{V_1} = mRT \ln\dfrac{p_1}{p_2}$

Tehnički rad $W = A$

Toplina $Q = A = W = T(S_2 - S_1)$

d) **Izentropa** $S = \text{konst}$

$pV^\kappa = \text{konst}$ $TV^{\kappa-1} = \text{konst}$ $T\left(\dfrac{1}{p}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \text{konst}$

Apsolutni rad $A = \dfrac{p_1V_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] = \dfrac{p_1V_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}\right]$

$= \dfrac{p_1V_1}{\kappa - 1}\left(1 - \dfrac{T_2}{T_1}\right) = \dfrac{1}{\kappa - 1}(p_1V_1 - p_2V_2)$

$= \dfrac{mR}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) = mc_v(T_1 - T_2)$

Tehnički rad pri izentropskoj promjeni stanja (= teoretski rad toplinskih strojeva) $W = \kappa A = mc_p(T_1 - T_2) = H_1 - H_2 = m(h_1 - h_2)$

Toplina $Q = 0$

e) **Politropa**

predstavlja općenitu promjenu stanja pri kojoj je promjena temperature upravno razmjerna dovedenoj ili odvedenoj toplini $\mathrm{d}Q = mc\mathrm{d}T$

$pV^n = \text{konst} \qquad n = \dfrac{c - c_p}{c - c_v} \qquad c = c_v \dfrac{n - \kappa}{n - 1}$

Apsolutni rad $\quad A = \dfrac{p_1V_1}{n-1}\left[1 - \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \dfrac{p_1V_1}{n-1}\left[1 - \left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}\right]$

$$= \frac{p_1V_1}{n-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{1}{n-1}(p_1V_1 - p_2V_2)$$

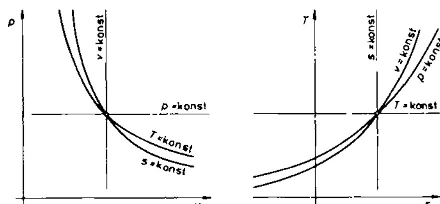
$$= \frac{mR}{n-1}(T_1 - T_2)$$

Tehnički rad $\quad W = nA$

Toplina $\quad Q = \dfrac{\kappa - n}{\kappa - 1} A$

*

Promjena stanja po politropi — kao općenita — obuhvaća sve prije navedene povrative promjene stanja koje su samo njezini posebni slučajevi.



Usporedba politropa

politropa		n	c
izohora	V = konst	$\pm\infty$	c_v
izobara	p = konst	0	c_p
izoterma	T = konst	1	$\pm\infty$
izentropa	S = konst	$\kappa = c_p/c_v$	0

Prigušivanje

je nepovrativa promjena stanja za koju kod idealnih plinova vrijedi:

izentalpa $\;h$ = konst $\qquad T$ = konst

Smjese idealnih plinova

(Indeksima 1, 2 . . . n označujemo veličine koje pripadaju pojedinim sastavinama u smjesi)

Masa smjese $\quad m = m_1 + m_2 + \ldots$

Volumen smjese $\quad V = V_1 + V_2 + \ldots$

Tlak smjese $\quad p = p_1 + p_2 + \ldots$

$p_1, p_2 \ldots$ su parcijalni tlakovi pojedinih plinova u smjesi (Daltonov zakon)

$p_1 = pV_1/V \qquad p_2 = pV_2/V$

Za smjesu plinova vrijedi ista jednadžba stanja kao i za homogene plinove

$$pV = mRT$$

Plinska konstanta smjese R i prividna molna masa smjese m_m

$$R = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} R_i \qquad m_\mathrm{m} = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} m_{\mathrm{m}i}$$

Gustoća smjese

$$\varrho = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} \varrho_i$$

Specifični toplinski kapaciteti i specifična entalpija smjese:

$$c_p = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} c_{pi} \qquad c_v = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} c_{vi} \qquad h = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} h_i$$

Zrak

Sastav potpuno suhog zraka

Sastavina	N_2	O_2	Ar	CO_2	H_2	He + Ne + Kr + Xe
volumni %	78,03	20,99	0,93	0,03	0,01	0,01
maseni %	75,47	23,20	1,28	0,046	0,001	0,003

Miješanje plinova (nepovrativi proces)

a) *Miješanje pri* V = konst

parcijalni tlak $p' = (p_1V_1/T_1) \cdot T/V$

tlak smjese $\quad p = p' + p'' + \ldots$

temperatura smjese

$$T = \sum_{i=1}^{n} m_i c_{vi} T_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i c_{vi}$$

b) *Miješanje pri* p = konst

parcijalni volumen $\quad V' = (p_1V_1/T_1) \cdot T/p$

volumen smjese $\quad V = V' + V'' + \ldots$

temperatura smjese

$$T = \sum_{i=1}^{n} m_i c_{pi} T_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i c_{pi}$$

PARE

Zasićena para

je smjesa dviju faza: tekuće i plinovite. Para ima u zasićenom stanju za svaku temperaturu točno određenu vrijednost tlaka.

Omjer mase plinovite faze (suhe pare) i mase cjelokupne smjese (suhe pare i tekućine) nazivamo »suhoća pare x«. S obzirom na x je zasićena para:

$x = 0$ – (v r e l a) t e k u ć i n a (bez pare),
$0 < x < 1$ – m o k r a p a r a, koja u jedinici mase sadrži x dijelova suhe pare i $(1 - x)$ dijelova tekućine,
$x = 1$ – s u h a p a r a (samo para, bez tekućine).

Različite veličine stanja pare, napose gustoću ϱ, specifični volumen v, specifičnu entalpiju h i specifičnu entropiju s označujemo:

pri stanju $x = 0$ oznakom ′ pri stanju $x = 1$ oznakom ″

Temperatura i odgovarajući tlak te ostale veličine zasićene pare pri stanju $x = 0$ i $x = 1$ nalaze se za najvažnije pare u tablicama na str. 172 do 174 i 188 do 191.

Za mokru paru $(0 < x < 1)$ vrijedi:

specifični volumen $v_x = v' + x(v'' - v')$
specifična entalpija $h_x = h' + x(h'' - h')$
specifična entropija $s_x = s' + x(s'' - s')$

Clapeyronova jednadžba prikazuje toplinu isparivanja r kao funkciju temperature zasićenja T_s, povećanja volumena pri isparivanju $v'' - v'$ i diferencijalnog kvocijenta $\mathrm{d}p/\mathrm{d}T$: $r = T_s\,(v'' - v') \cdot (\mathrm{d}p/\mathrm{d}T)$ $\quad r = h'' - h'$

Pregrijana para

je realni plin koji je pregrijan iznad temperature zasićenja i ne sadrži više nikakve tekućine.

Obično smatramo pregrijanom onu paru koja nije pregrijana mnogo iznad temperature zasićenja i nju moramo računati po posebnim zakonima za pregrijanu paru, dok se visoko pregrijane pare postupno približuju svojstvima idealnih plinova.

Veličine stanja pregrijane pare (p, v, h, s) funkcije su tlaka i temperature:

$$pv = RT + f_1(p, T) \qquad h = h'' + \int c_p \mathrm{d}T \qquad s = s'' + \int c_p\,(\mathrm{d}T/T)$$
$$c_p = f_2(p, T)$$

Za pregrijanu paru sastavljene su razne tablice o parama, npr.:
- za zrak (ako uzimamo u obzir odstupanje od idealnih plinova) na str. 169.
- za pregrijanu vodenu paru na str. 175 do 187.

Pregled šireg područja (zasićene i pregrijane) vodene pare prikazuje posebno zorno Mollierov h, s-dijagram (str. 170 i 171).

Zrak

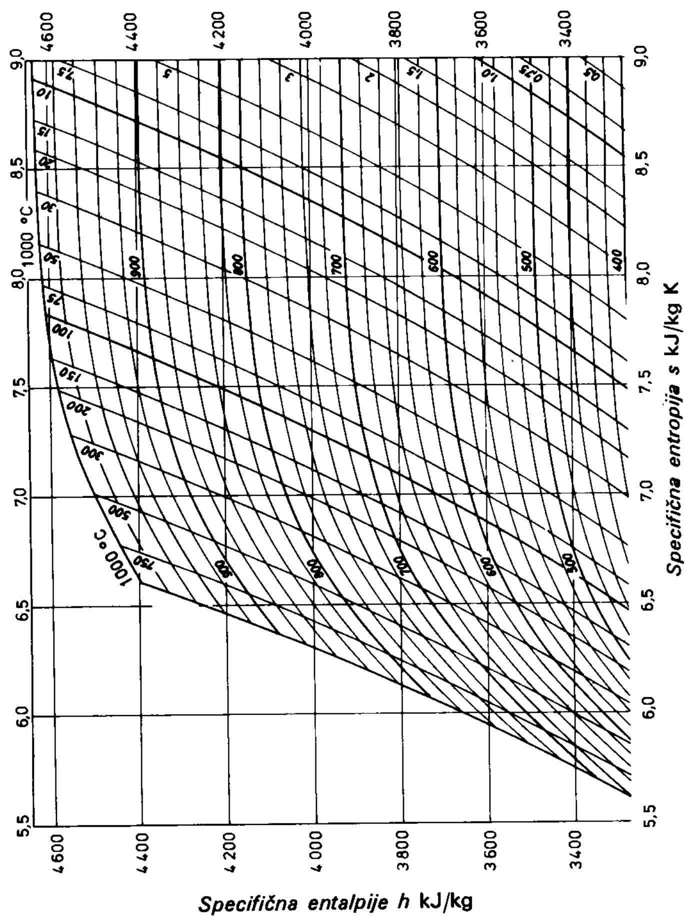
kao pregrijana para (koji pri točnijem računanju odstupa od zakona idealnih plinova)

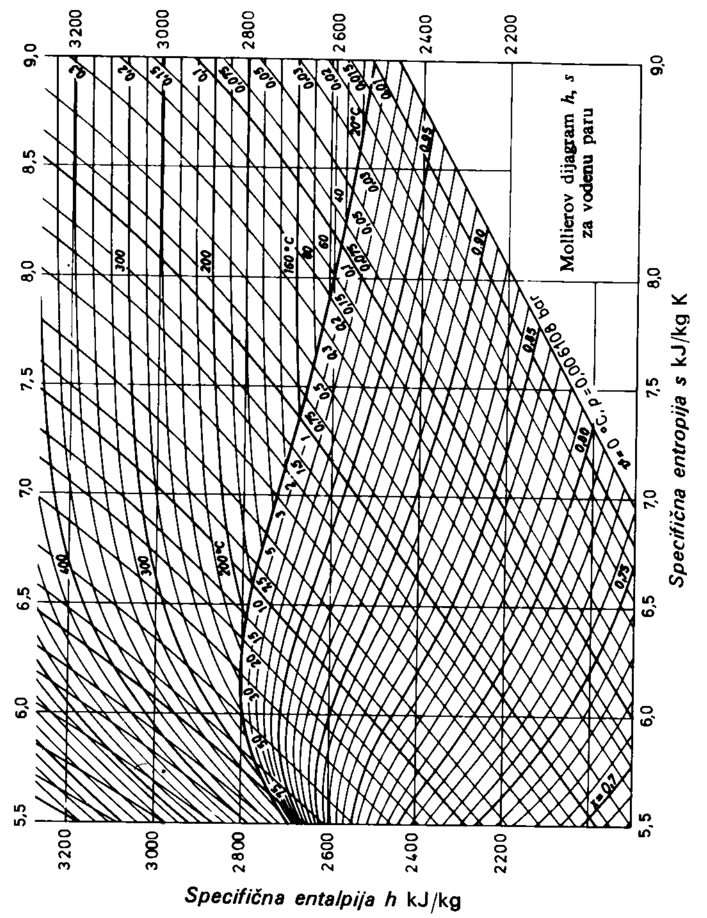
Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h*, specifična entropija s*

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 1 bar			5 bar		
—100	0,495 1	172,8	6,359	0,097 66	170,0	5,843
— 50	0,639 3	223,1	6,656	0,127 3	221,3	6,106
0	0,783 8	273,3	6,859	0,156 6	272,1	6,311
50	0,926 5	323,6	7,026	0,185 4	322,8	6,479
100	1,071	374,1	7,172	0,214 4	373,5	6,584
200	1,356	476,1	7,415	0,271 6	475,7	6,868
400	1,930	686,1	7,775	0,386 7	686,1	7,229
	$p =$ 10 bar			20 bar		
—100	0,047 98	166,7	5,632	0,023 14	159,7	5,403
— 50	0,063 29	219,3	5,899	0,031 29	215,3	5,687
0	0,078 17	270,9	6,121	0,038 97	268,0	5,900
50	0,092 71	321,9	6,277	0,046 39	319,9	6,072
100	0,107 3	372,8	6,424	0,053 80	371,5	6,221
200	0,136 1	475,2	6,668	0,068 33	474,4	6,467
400	0,193 8	686,1	7,030	0,097 31	686,1	6,830
	$p =$ 40 bar			60 bar		
—100	0,010 72	144,4	5,137	0,006 582	118,0	4,944
— 50	0,015 29	207,1	5,460	0,009 955	195,0	5,315
0	0,019 36	262,8	5,685	0,012 83	255,2	5,552
50	0,023 22	316,2	5,862	0,015 50	311,0	5,734
100	0,027 03	368,9	6,015	0,018 11	365,2	5,890
200	0,034 44	473,2	6,263	0,023 15	471,8	6,142
400	0,049 08	686,2	6,629	0,033 00	686,4	6,510
	$p =$ 80 bar			100 bar		
—100	0,004 512	109,2	4,938	0,003 270	94,6	4,652
— 50	0,007 288	191,2	5,204	0,005 688	183,7	5,114
0	0,009 564	252,8	5,454	0,007 604	248,1	5,420
50	0,011 64	309,3	5,641	0,009 328	306,1	5,567
100	0,013 65	364,0	5,800	0,010 97	361,9	5,729
200	0,017 50	471,2	6,056	0,014 11	470,2	5,987
400	0,024 96	686,6	6,425	0,020 14	686,8	6,359

* Ishodište za specifičnu entalpiju h i specifičnu entropiju s izabrano je pri (idealiziranoj) apsolutnoj nuli.


Specifična entalpije h kJ/kg
Specifična entropija s kJ/kg K
1000 °C


Mollierov dijagram h, s
za vodenu paru
Specifična entalpija h kJ/kg
Specifična entropija s kJ/kg K

Zasićena vodena para

Toplinska svojstva pri temperaturama od 0 do 374,15 °C

Temperatura t_s, tlak p, specifični volumen v', v''; specifična entalpija h', h''; specifična entropija s', s''

t_s °C	p bar	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,04	0,006 112	0,001 000 2	206,2	0,00	2 502	0,000 0	9,158
5	0,008 718	0,001 000 0	147,2	21,01	2 511	0,076 2	9,027
10	0,012 27	0,001 000 3	106,4	41,99	2 520	0,151 0	8,902
15	0,017 04	0,001 001	77,98	62,94	2 529	0,224 3	8,783
20	0,023 37	0,001 002	57,84	83,86	2 538	0,296 3	8,668
25	0,031 66	0,001 003	43,40	104,8	2 547	0,367 0	8,559
30	0,042 41	0,001 004	32,93	125,7	2 556	0,436 5	8,455
35	0,056 22	0,001 006	25,24	146,6	2 565	0,504 9	8,354
40	0,073 75	0,001 008	19,55	167,5	2 574	0,572 1	8,258
45	0,095 82	0,001 010	15,28	188,4	2 583	0,638 3	8,166
50	0,123 4	0,001 012	12,05	209,3	2 592	0,703 5	8,078
55	0,157 4	0,001 015	9,579	230,2	2 601	0,767 7	7,993
60	0,199 2	0,001 017	7,679	251,1	2 610	0,831 0	7,911
65	0,250 1	0,001 020	6,202	272,0	2 618	0,893 3	7,832
70	0,311 6	0,001 023	5,046	293,0	2 627	0,954 8	7,757
75	0,385 5	0,001 026	4,134	313,9	2 635	1,015	7,684
80	0,473 6	0,001 029	3,409	334,9	2 644	1,075	7,613
85	0,578 0	0,001 033	2,829	355,9	2 652	1,134	7,545
90	0,701 1	0,001 036	2,361	376,9	2 660	1,193	7,480
95	0,845 3	0,001 040	1,982	398,0	2 668	1,250	7,417
100	1,013 3	0,001 044	1,673	419,1	2 676	1,307	7,355
105	1,208	0,001 048	1,419	440,2	2 684	1,363	7,296
110	1,433	0,001 052	1,210	461,3	2 691	1,419	7,239
115	1,691	0,001 056	1,036	482,5	2 699	1,473	7,183
120	1,985	0,001 061	0,891 5	503,7	2 706	1,528	7,129
125	2,321	0,001 065	0,770 2	525,0	2 713	1,581	7,077
130	2,701	0,001 070	0,668 1	546,3	2 720	1,634	7,026
135	3,131	0,001 075	0,581 8	567,7	2 727	1,687	6,977
140	3,614	0,001 080	0,508 5	589,1	2 733	1,739	6,928
145	4,155	0,001 085	0,446 0	610,6	2 739	1,791	6,882
150	4,760	0,001 091	0,392 4	632,2	2 745	1,842	6,836
155	5,433	0,001 096	0,346 4	653,8	2 751	1,892	6,791
160	6,181	0,001 102	0,306 8	675,5	2 757	1,943	6,748
165	7,008	0,001 108	0,272 4	697,3	2 762	1,992	6,705
170	7,920	0,001 115	0,242 6	719,1	2 767	2,042	6,663
175	8,924	0,001 121	0,216 5	741,1	2 772	2,091	6,622
180	10,03	0,001 128	0,193 8	763,1	2 776	2,139	6,582
185	11,23	0,001 134	0,173 9	785,3	2 780	2,188	6,542
190	12,55	0,001 142	0,156 3	807,5	2 784	2,236	6,504
195	13,99	0,001 149	0,140 8	829,9	2 788	2,283	6,465
200	15,55	0,001 157	0,127 2	852,4	2 791	2,331	6,428
205	17,24	0,001 164	0,115 0	875,0	2 794	2,378	6,391
210	19,08	0,001 173	0,104 2	897,7	2 796	2,425	6,354
215	21,06	0,001 181	0,094 63	920,6	2 798	2,471	6,318
220	23,20	0,001 190	0,086 04	943,7	2 800	2,518	6,282
225	25,50	0,001 199	0,078 35	966,9	2 801	2,564	6,246
230	27,98	0,001 209	0,071 45	990,3	2 802	2,610	6,211
235	30,63	0,001 219	0,065 25	1 014	2 802	2,656	6,176
240	33,48	0,001 229	0,059 65	1 038	2 802	2,702	6,141
245	36,52	0,001 240	0,054 61	1 062	2 802	2,748	6,106
250	39,78	0,001 251	0,050 04	1 086	2 800	2,794	6,071
255	43,25	0,001 263	0,045 90	1 110	2 799	2,839	6,036
260	46,94	0,001 276	0,042 13	1 135	2 796	2,885	6,001
265	50,88	0,001 289	0,038 71	1 160	2 794	2,931	5,966
270	55,06	0,001 303	0,035 59	1 185	2 790	2,976	5,930
275	59,50	0,001 317	0,032 74	1 211	2 786	3,022	5,895
280	64,20	0,001 332	0,030 13	1 237	2 780	3,068	5,859
285	69,19	0,001 349	0,027 73	1 263	2 774	3,115	5,822
290	74,46	0,001 366	0,025 54	1 290	2 768	3,161	5,785
295	80,04	0,001 384	0,023 51	1 317	2 760	3,208	5,747
300	85,93	0,001 404	0,021 65	1 345	2 751	3,255	5,708
305	92,14	0,001 425	0,019 93	1 373	2 741	3,303	5,669
310	98,70	0,001 448	0,018 33	1 402	2 730	3,351	5,628
315	105,6	0,001 473	0,016 86	1 432	2 718	3,400	5,586
320	112,9	0,001 500	0,015 48	1 463	2 704	3,450	5,542
325	120,6	0,001 529	0,014 19	1 494	2 688	3,501	5,497
330	128,6	0,001 562	0,012 99	1 527	2 670	3,553	5,449
335	137,1	0,001 598	0,011 85	1 560	2 650	3,606	5,398
340	146,1	0,001 639	0,010 78	1 596	2 626	3,662	5,343
345	155,5	0,001 686	0,009 763	1 633	2 599	3,719	5,283
350	165,4	0,001 741	0,008 799	1 672	2 568	3,780	5,218
355	175,8	0,001 809	0,007 859	1 717	2 530	3,849	5,144
360	186,8	0,001 896	0,006 940	1 764	2 485	3,921	5,060
365	198,3	0,002 016	0,006 012	1 818	2 428	4,002	4,958
370	210,5	0,002 214	0,004 973	1 890	2 343	4,111	4,814
374,15	221,20	0,003 17		2 107,4		4,442 9	

Zasićena vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku od 0,01 do 200 bar

Tlak p, temper. t_s, spec. vol. v', v''; spec. entalp. h', h''; spec. entrop. s', s''

p bar	t_s °C	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,01	6,983	0,001 000	129,2	29,34	2 514	0,106 0	8,977
0,02	17,51	0,001 001	67,01	73,46	2 534	0,260 7	8,725
0,04	28,98	0,001 004	34,80	121,4	2 555	0,422 5	8,476
0,06	36,18	0,001 006	23,74	151,5	2 568	0,520 9	8,331
0,08	41,53	0,001 008	18,10	173,9	2 577	0,592 5	8,230
0,1	45,83	0,001 010	14,67	191,8	2 585	0,649 3	8,151
0,12	49,45	0,001 012	12,36	206,9	2 591	0,696 3	8,087
0,16	55,34	0,001 015	9,433	231,6	2 602	0,772 1	7,987
0,2	60,09	0,001 017	7,650	251,5	2 610	0,832 1	7,909
0,25	64,99	0,001 020	6,204	272,0	2 618	0,893 2	7,832
0,3	69,12	0,001 022	5,229	289,3	2 625	0,944 1	7,770
0,4	75,89	0,001 027	3,993	317,7	2 637	1,026	7,671
0,5	81,35	0,001 030	3,240	340,6	2 646	1,091	7,595
0,6	85,95	0,001 033	2,732	359,9	2 654	1,145	7,533
0,8	93,51	0,001 039	2,087	391,7	2 666	1,233	7,435
1,0	99,63	0,001 043	1,694	417,5	2 675	1,303	7,360
1,2	104,8	0,001 048	1,428	439,4	2 683	1,361	7,298
1,6	113,3	0,001 055	1,091	475,4	2 696	1,455	7,202
2,0	120,2	0,001 061	0,885 4	504,7	2 706	1,530	7,127
2,5	127,4	0,001 068	0,718 4	535,3	2 716	1,607	7,052
3	133,5	0,001 074	0,605 6	561,4	2 725	1,672	6,991
4	143,6	0,001 084	0,462 2	604,7	2 738	1,776	6,894
5	151,8	0,001 093	0,374 7	640,1	2 748	1,860	6,819
6	158,8	0,001 101	0,315 5	670,4	2 756	1,931	6,758
8	170,4	0,001 115	0,240 3	720,9	2 768	2,046	6,660
10	179,9	0,001 127	0,194 3	762,6	2 776	2,138	6,583
12	188,0	0,001 139	0,163 2	798,4	2 783	2,216	6,519
16	201,4	0,001 159	0,123 7	858,6	2 792	2,344	6,418
20	212,4	0,001 177	0,099 54	908,6	2 797	2,447	6,337
25	223,9	0,001 197	0,079 91	962,0	2 801	2,554	6,254
30	233,8	0,001 216	0,066 63	1 008	2 802	2,646	6,184
40	250,3	0,001 252	0,049 75	1 087	2 800	2,797	6,069
50	263,9	0,001 286	0,039 43	1 155	2 794	2,921	5,974
60	275,6	0,001 319	0,032 44	1 214	2 785	3,027	5,891
80	295,0	0,001 384	0,023 53	1 317	2 760	3,208	5,747
100	311,0	0,001 453	0,018 04	1 408	2 728	3,361	5,620
120	324,7	0,001 527	0,014 28	1 492	2 689	3,497	5,500
160	347,3	0,001 710	0,009 308	1 651	2 585	3,747	5,253
200	365,7	0,002 037	0,005 877	1 827	2 418	4,015	4,941

Voda i pregrijana vodena para

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 0,01 bar			0,02 bar		
0	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2
20	135,2	2 539	9,061	67,58	2 538	8,740
40	144,5	2 576	9,184	72,21	2 576	8,864
60	153,7	2 613	9,300	76,84	2 613	8,980
80	163,0	2 651	9,410	81,46	2 651	9,089
100	172,2	2 689	9,514	86,08	2 689	9,193
	p = 0,04 bar			0,06 bar		
0	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	36,08	2 575	8,543	24,04	2 575	8,354
60	38,40	2 613	8,659	25,59	2 612	8,471
80	40,71	2 650	8,769	27,13	2 650	8,581
100	43,03	2 688	8,873	28,68	2 688	8,685
120	45,34	2 726	8,972	30,22	2 726	8,785
	p = 0,08 bar			0,10 bar		
0	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	19,18	2 612	8,337	15,34	2 612	8,233
80	20,34	2 650	8,448	16,27	2 650	8.344
100	21,50	2 688	8,552	17,20	2 688	8,449
120	22,66	2 726	8,652	18,12	2 726	8,548
	p = 0,12 bar			0,16 bar		
0	0.001 000 2	—0,0	—0,000 2	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	12,77	2 611	8,148	9,570	2 611	8,014
80	13,55	2 649	8,259	10,16	2 649	8,125
100	14,33	2 687	8,364	10,74	2 687	8,230
120	15,10	2 725	8,464	11.32	2 725	8,330
140	15,87	2 764	8,559	11,90	2 763	8,425

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 0,2 bar			0,25 bar		
0	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	8,117	2 648	8,021	6,488	2 647	7,916
100	8,585	2 686	8,126	6,864	2 686	8,022
120	9,051	2 725	8,226	7,237	2 724	8,123
140	9,516	2 763	8,322	7,611	2 763	8,219
160	9,980	2 802	8,413	7,982	2 801	8,310

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 0,3 bar			0,4 bar		
0	0,001 000 2	—0,0	—0,000 2	0,001 000 2	0,0	—0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	5,401	2 647	7,830	4,042	2 645	7,694
100	5,714	2 685	7,936	4,279	2 684	7,801
120	6,027	2 724	8,037	4,515	2 723	7,902
140	6,338	2 762	8,133	4,749	2 761	7,999
160	6,648	2 801	8,224	4,983	2 800	8,090
180	6,958	2 840	8,312	5,215	2 839	8,178

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 0,5 bar			0,6 bar		
0	0,001 000 2	0,0	—0,000 2	0,001 000 2	0,0	—0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	0,001 029	334,9	1,075	0,001 029	334,9	1,075
100	3,418	2 683	7,695	2,844	2 681	7,609
120	3,607	2 722	7,797	3,002	2 721	7,711
140	3,796	2 761	7,894	3,160	2 760	7,808
160	3,983	2 800	7,986	3,317	2 799	7,901
180	4,170	2 839	8,074	3,473	2 838	7,989
200	4,356	2 878	8,159	3,628	2 877	8,074

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 0,8 bar			1,0 bar		
0	0,001 000 2	0,0	—0,000 1	0,001 000 2	0,1	—0,000 1
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	84,0	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,2	0,830 9
80	0,001 029	334,9	1,075	0,001 029	335,0	1,075
100	2,126	2 679	7,470	1,696	2 676	7,362
120	2,246	2 719	7,574	1,793	2 717	7,467
140	2,365	2 758	7,672	1,889	2 756	7,566
160	2,484	2 798	7,766	1,984	2 796	7,660
180	2,601	2 837	7,854	2,078	2 836	7,750
200	2,718	2 876	7,940	2,172	2 875	7,835
220	2,835	2 916	8,021	2,266	2 915	7,917
240	2,952	2 955	8,100	2,359	2 955	7,996
260	3,068	2 995	8,176	2,453	2 994	8,072
280	3,184	3 035	8,249	2,546	3 034	8,145
300	3,300	3 075	8,320	2,639	3 075	8,217

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 1,2 bar			1,6 bar		
0	0,001 000 2	0,1	—0,000 1	0,001 000 1	0,1	—0,000 1
20	0,001 002	84,0	0,296 3	0,001 002	84,0	0,296 3
40	0,001 008	167,6	0,572 1	0,001 008	167,6	0,572 1
60	0,001 017	251,2	0,830 9	0,001 017	251,2	0,830 9
80	0,001 029	335,0	1,075	0,001 029	335,0	1,075
100	0,001 044	419,1	1,307	0,001 044	419,1	1,307
120	1,490	2 714	7,379	1,112	2 710	7,237
140	1,571	2 755	7,479	1,173	2 751	7,340
160	1,651	2 795	7,573	1,234	2 792	7,436
180	1,730	2 835	7,663	1,294	2 832	7,527
200	1,808	2 874	7,749	1,353	2 873	7,613
220	1,887	2 914	7,832	1,413	2 913	7,696
240	1,965	2 954	7,911	1,471	2 953	7,776
260	2,043	2 994	7,987	1,530	2 993	7,852
280	2,120	3 034	8,061	1,588	3 033	7,926
300	2,198	3 074	8,132	1,647	3 073	7,998

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 2,0 bar			2,5 bar		
0	0,001 000 1	0,2	—0,000 1	0,001 000 1	0,2	—0,000 1
20	0,001 002	84,0	0,296 3	0,001 002	84,1	0,296 2
40	0,001 008	167,6	0,572 0	0,001 008	167,7	0,572 0
60	0,001 017	251,2	0,830 9	0,001 017	251,3	0,830 9
80	0,001 029	335,0	1,075	0,001 029	335,1	1,075
100	0,001 044	419,1	1,307	0,001 044	419,2	1,307
120	0,001 061	503,7	1,528	0,001 061	503,8	1,528
140	0,934 9	2 748	7,230	0,744 0	2 743	7,118
160	0,984 0	2 789	7,328	0,784 0	2 786	7,218
180	1,033	2 830	7,420	0,823 2	2 827	7,312
200	1,080	2 871	7,507	0,862 0	2 868	7,400
220	1,128	2 911	7,591	0,900 4	2 909	7,485
240	1,175	2 951	7,671	0,938 5	2 949	7,565
260	1,222	2 991	7,748	0,976 3	2 990	7,643
280	1,269	3 032	7,822	1,014	3 030	7,717
300	1,316	3 072	7,894	1,052	3 071	7,789

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 3 bar			4 bar		
0	0,001 000 1	0,3	—0,000 1	0,001 000	0,4	—0,000 1
20	0,001 002	84,1	0,296 2	0,001 002	84,2	0,296 2
40	0,001 008	167,7	0,572 0	0,001 008	167,8	0,572 0
60	0,001 017	251,3	0,830 8	0,001 017	251,4	0,830 8
80	0,001 029	335,1	1,075	0,001 029	335,2	1,075
100	0,001 044	419,2	1,307	0,001 044	419,3	1,307
120	0,001 061	503,8	1,528	0,001 061	503,9	1,527
140	0,616 7	2 739	7,025	0,001 080	589,1	1,739
160	0,650 6	2 782	7,127	0,483 7	2 774	6,981
180	0,683 7	2 824	7,222	0,509 3	2 818	7,079
200	0,716 4	2 866	7,312	0,534 3	2 860	7,171
220	0,748 6	2 907	7,397	0,558 9	2 902	7,258
240	0,780 5	2 948	7,478	0,583 1	2 944	7,340
260	0,812 3	2 988	7,556	0,607 2	2 985	7,419
280	0,843 8	3 029	7,631	0,631 1	3 026	7,495
300	0,875 3	3 070	7,703	0,654 9	3 067	7,568

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 5 bar			6 bar		
0	0,001 000	0,5	—0,000 1	0,001 000	0,6	—0,000 1
20	0,001 002	84,3	0,296 2	0,001 002	84,4	0,296 2
40	0,001 008	167,9	0,571 9	0,001 008	168,0	0,571 9
60	0,001 017	251,5	0,830 7	0,001 017	251,6	0,830 7
80	0,001 029	335,3	1,075	0,001 029	335,4	1,075
100	0,001 044	419,4	1,307	0,001 043	419,4	1,307
120	0,001 061	503,9	1,527	0,001 060	504,0	1,527
140	0,001 080	589,2	1,739	0,001 080	589,3	1,739
160	0,383 5	2 766	6,863	0,316 5	2 758	6,764
180	0,404 5	2 811	6,965	0,334 6	2 805	6,869
200	0,425 0	2 855	7,059	0,352 0	2 850	6,966
220	0,445 0	2 898	7,148	0,369 0	2 894	7,057
240	0,464 7	2 940	7,232	0,385 7	2 936	7,142
260	0,484 1	2 982	7,312	0,402 1	2 979	7,223
280	0,503 4	3 023	7,388	0,418 3	3 021	7,300
300	0,522 6	3 065	7,461	0,434 4	3 062	7,374
320	0,541 6	3 106	7,532	0,450 4	3 104	7,445
340	0,560 6	3 147	7,601	0,466 3	3 145	7,514
360	0,579 5	3 189	7,667	0,482 1	3 187	7,581
380	0,598 4	3 230	7,732	0,497 9	3 229	7,646
400	0,617 2	3 272	7,795	0,513 6	3 271	7,709
420	0,635 9	3 314	7,856	0,529 3	3 313	7,771
440	0,654 7	3 356	7,916	0,545 0	3 355	7,831
460	0,673 4	3 398	7,975	0,560 6	3 397	7,889
480	0,692 1	3 441	8,032	0,576 2	3 440	7,947
500	0,710 8	3 484	8,088	0,591 8	3 483	8,003
520	0,729 4	3 527	8,143	0,607 4	3 526	8,058
540	0,748 1	3 570	8,197	0,623 0	3 569	8,112
560	0,766 7	3 614	8,250	0,638 6	3 613	8,165
580	0,785 3	3 657	8,302	0,654 1	3 657	8,217
600	0,803 9	3 702	8,353	0,669 6	3 701	8,268
620	0,822 5	3 746	8,403	0,685 1	3 745	8,318
640	0,841 1	3 790	8,452	0,700 7	3 790	8,367

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg (p = 8 bar)	h kJ/kg (p = 8 bar)	s kJ/kg K (p = 8 bar)	v m³/kg (p = 10 bar)	h kJ/kg (p = 10 bar)	s kJ/kg K (p = 10 bar)
0	0,001 000	0,8	−0,000 1	0,001 000	1,0	−0,000 1
20	0,001 001	84,6	0,296 1	0,001 001	84,8	0,296 1
40	0,001 008	168,2	0,571 8	0,001 007	168,3	0,571 7
60	0,001 017	251,7	0,830 6	0,001 017	251,9	0,830 5
80	0,001 029	335,5	1,075	0,001 029	335,7	1,075
100	0,001 043	419,6	1,306	0,001 043	419,7	1,306
120	0,001 060	504,1	1,527	0,001 060	504,3	1,527
140	0,001 080	589,4	1,739	0,001 080	589,5	1,738
160	0,001 102	675,6	1,942	0,001 102	675,7	1,942
180	0,247 1	2 791	6,712	0,194 4	2 777	6,584
200	0,260 8	2 839	6,815	0,205 9	2 827	6,692
220	0,274 0	2 884	6,909	0,216 9	2 875	6,791
240	0,286 9	2 929	6,998	0,227 6	2 921	6,883
260	0,299 5	2 972	7,081	0,237 9	2 965	6,968
280	0,311 9	3 015	7,160	0,248 0	3 009	7,049
300	0,324 1	3 057	7,235	0,258 0	3 052	7,125
320	0,336 3	3 099	7,307	0,267 8	3 095	7,198
340	0,348 3	3 141	7,377	0,277 6	3 137	7,269
360	0,360 3	3 183	7,444	0,287 3	3 180	7,337
380	0,372 3	3 225	7,509	0,296 9	3 222	7,403
400	0,384 2	3 268	7,573	0,306 5	3 264	7,467
420	0,396 0	3 310	7,635	0,316 0	3 307	7,529
440	0,407 8	3 352	7,695	0,325 6	3 350	7,589
460	0,419 6	3 395	7,754	0,335 0	3 392	7,648
480	0,431 4	3 438	7,812	0,344 5	3 435	7,706
500	0,443 2	3 481	7,868	0,354 0	3 478	7,763
520	0,454 9	3 524	7,923	0,363 4	3 522	7,818
540	0,466 6	3 567	7,977	0,372 8	3 565	7,872
560	0,478 3	3 611	8,030	0,382 2	3 609	7,926
580	0,490 0	3 655	8,082	0,391 6	3 653	7,978
600	0,501 7	3 699	8,134	0,401 0	3 697	8,029
620	0,513 4	3 744	8,184	0,410 4	3 742	8,080
640	0,525 1	3 788	8,233	0,419 7	3 787	8,129

t °C	v m³/kg (p = 12 bar)	h kJ/kg (p = 12 bar)	s kJ/kg K (p = 12 bar)	v m³/kg (p = 16 bar)	h kJ/kg (p = 16 bar)	s kJ/kg K (p = 16 bar)
0	0,001 000	1,2	−0,000 1	0,000 999 4	1,6	−0,000 0
20	0,001 001	85,0	0,296 1	0,001 001	85,4	0,296 0
40	0,001 007	168,5	0,571 7	0,001 007	168,9	0,571 5
60	0,001 017	252,1	0,830 4	0,001 016	252,4	0,830 1
80	0,001 029	335,8	1,075	0,001 028	336,1	1,074
100	0,001 043	419,9	1,306	0,001 043	420,2	1,306
120	0,001 060	504,4	1,527	0,001 060	504,7	1,526
140	0,001 080	589,6	1,738	0,001 079	589,9	1,738
160	0.001 102	675,8	1,942	0,001 102	676,0	1,941
180	0,001 127	763,2	2,139	0,001 127	763,4	2,139
200	0,169 2	2 814	6,587	0,001 156	852,4	2,331
220	0,178 8	2 865	6,691	0,131 0	2 843	6,524
240	0,187 9	2 912	6,786	0,138 3	2 895	6.626
260	0,196 8	2 958	6,874	0,145 3	2 944	6 720
280	0,205 4	3 003	6,956	0,152 1	2 991	6,806
300	0,213 9	3 047	7,034	0,158 7	3 036	6,887
320	0,222 2	3 090	7,109	0,165 1	3 081	6,964
340	0,230 4	3 133	7,180	0,171 4	3 125	7,037
360	0,238 6	3 176	7,248	0,177 7	3 169	7,107
380	0,246 7	3 219	7,315	0,183 8	3 212	7,174
400	0,254 7	3 261	7,379	0,190 0	3 255	7,239
420	0,262 7	3 304	7,442	0,196 1	3 298	7,303
440	0,270 7	3 347	7,502	0,202 1	3 341	7,364
460	0,278 7	3 390	7,562	0,208 2	3 385	7,424
480	0,286 6	3 433	7,620	0,214 2	3 428	7,482
500	0,294 5	3 476	7,677	0,220 2	3 472	7,540
520	0,302 4	3 520	7,732	0,226 1	3 515	7,595
540	0,310 3	3 563	7,786	0,232 1	3 559	7,650
560	0,318 1	3 607	7,840	0,238 0	3 604	7,704
580	0,326 0	3 651	7,892	0,244 0	3 648	7,756
600	0,333 8	3 696	7,944	0,249 9	3 693	7,808
620	0,341 7	3 740	7,994	0,255 8	3 737	7,859
640	0,349 5	3 785	8,044	0,261 7	3 782	7,909

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 20 bar			25 bar		
0	0,000 999 2	2,0	—0,000 0	0,000 999 0	2,5	0,000 0
20	0,001 001	85,7	0,295 9	0,001 001	86,2	0,295 8
40	0,001 007	169,2	0,571 3	0,001 007	169,7	0,571 1
60	0,001 016	252,7	0,829 9	0,001 016	253,2	0,829 7
80	0,001 028	336,5	1,074	0,001 028	336,9	1,074
100	0,001 043	420,5	1,305	0,001 043	420,9	1,305
120	0,001 060	505,0	1,526	0,001 059	505,3	1,526
140	0,001 079	590,2	1,737	0,001 079	590,5	1,737
160	0,001 101	676,3	1,941	0,001 101	676,6	1,940
180	0,001 127	763,6	2,138	0,001 126	763,9	2,137
200	0,001 156	852,6	2,330	0,001 156	852,8	2,329
220	0,102 1	2 820	6,383	0,001 190	943,7	2,518
240	0,108 4	2 876	6,494	0,084 36	2 851	6,352
260	0,114 4	2 928	6,594	0,089 51	2 907	6,461
280	0,120 0	2 978	6,685	0,094 33	2 960	6,558
300	0,125 5	3 025	6,770	0,098 93	3 010	6,647
320	0,130 8	3 071	6,849	0,103 4	3 059	6,730
340	0,136 0	3 116	6,924	0,107 6	3 105	6,807
360	0,141 1	3 161	6,995	0,111 8	3 151	6,880
380	0,146 1	3 205	7,064	0,116 0	3 196	6,951
400	0,151 1	3 249	7,130	0,120 0	3 241	7,018
420	0,156 1	3 292	7,194	0,124 1	3 285	7,083
440	0,161 0	3 336	7,256	0,128 1	3 329	7,146
460	0,165 9	3 380	7,316	0,132 0	3 373	7,207
480	0,170 7	3 423	7,375	0,136 0	3 418	7,266
500	0,175 6	3 467	7,432	0,139 9	3 462	7,324
520	0,180 4	3 511	7,489	0,143 8	3 506	7,381
540	0,185 2	3 556	7,544	0,147 7	3 551	7,436
560	0,190 0	3 600	7,597	0,151 5	3 595	7,490
580	0,194 7	3 644	7,650	0,155 4	3 640	7,543
600	0,199 5	3 689	7,702	0,159 2	3 685	7,596
620	0,204 3	3 734	7,753	0,163 0	3 730	7,647
640	0,209 0	3 779	7,803	0,166 9	3 776	7,697

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p =$ 30 bar			40 bar		
0	0,000 998 7	3,0	0,000 1	0,000 998 2	4,0	0,000 2
20	0,001 000	86,7	0,295 7	0,000 999 9	87,6	0,295 5
40	0,001 007	170,1	0,571 0	0,001 006	171,0	0,570 6
60	0,001 016	253,6	0,829 4	0,001 015	254,4	0,828 9
80	0,001 028	337,3	1,073	0,001 027	338,1	1,073
100	0,001 042	421,2	1,305	0,001 042	422,0	1,304
120	0,001 059	505,7	1,525	0,001 058	506,4	1,524
140	0,001 078	590,8	1,736	0,001 078	591,5	1,735
160	0,001 101	676,9	1,940	0,001 100	677,5	1,939
180	0,001 126	764,1	2,137	0,001 125	764,6	2,135
200	0,001 155	853,0	2,328	0,001 154	853,4	2,327
220	0,001 189	943,9	2,517	0,001 188	944,1	2,515
240	0,068 16	2 823	6,224	0,001 228	1 038	2,701
260	0,072 83	2 885	6,343	0,051 72	2 836	6,135
280	0,077 12	2 942	6,448	0,055 44	2 902	6,258
300	0,081 16	2 995	6,542	0,058 83	2 962	6,364
320	0,085 00	3 045	6,629	0,062 00	3 018	6,459
340	0,088 71	3 094	6,709	0,064 99	3 070	6,546
360	0,092 32	3 141	6,784	0,067 87	3 120	6,627
380	0,095 84	3 187	6,856	0,070 66	3 168	6,702
400	0,099 31	3 233	6,925	0,073 38	3 216	6,773
420	0,102 7	3 278	6,991	0,076 04	3 262	6,841
440	0,106 1	3 322	7,054	0,078 66	3 308	6,907
460	0,109 5	3 367	7,116	0,081 25	3 354	6,970
480	0,112 8	3 412	7,176	0,083 81	3 400	7,031
500	0,116 1	3 456	7,235	0,086 34	3 445	7,091
520	0,119 4	3 501	7,292	0,088 86	3 490	7,149
540	0,122 6	3 546	7,347	0,091 35	3 536	7,206
560	0,125 9	3 591	7,402	0,093 84	3 581	7,261
580	0,129 1	3 636	7,455	0,096 31	3 627	7,315
600	0,132 3	3 681	7,508	0,098 76	3 673	7,368
620	0,135 6	3 727	7,559	0,101 2	3 719	7,420
640	0,138 8	3 772	7,610	0,103 6	3 765	7,471

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 50 bar			60 bar		
0	0,000 997 7	5,1	0,000 2	0,000 997 2	6,1	0,000 3
20	0,000 999 5	88,6	0,295 2	0,000 999 0	89,5	0,295 0
40	0,001 006	171,9	0,570 2	0,001 005	172,7	0,569 8
60	0,001 015	255,3	0,828 3	0,001 014	256,1	0,827 8
80	0,001 027	338,8	1,072	0,001 026	339,6	1,071
100	0,001 041	422,7	1,303	0,001 041	423,5	1,302
120	0,001 058	507,1	1,523	0,001 057	507,8	1,522
140	0,001 077	592,1	1,734	0,001 076	592,8	1,733
160	0,001 099	678,1	1,937	0,001 098	678,6	1,936
180	0,001 124	765,2	2,134	0,001 123	765,7	2,133
200	0,001 153	853,8	2,325	0,001 152	854,2	2,324
220	0,001 187	944,4	2,513	0,001 185	944,7	2,511
240	0,001 226	1 038	2,698	0,001 225	1 038	2,696
260	0,001 275	1 135	2,884	0,001 273	1 135	2,881
280	0,042 22	2 857	6,089	0,033 17	2 805	5,927
300	0,045 30	2 926	6,211	0,036 14	2 885	6,069
320	0,048 10	2 987	6,316	0,038 74	2 954	6,188
340	0,050 70	3 044	6,411	0,041 11	3 017	6,291
360	0,053 16	3 098	6,497	0,043 30	3 074	6,384
380	0,055 51	3 149	6,576	0,045 39	3 128	6,468
400	0,057 79	3 198	6,651	0,047 38	3 180	6,546
420	0,060 01	3 247	6,722	0,049 31	3 230	6,620
440	0,062 18	3 294	6,789	0,051 18	3 279	6,689
460	0,064 31	3 341	6,854	0,053 02	3 327	6,756
480	0,066 42	3 387	6,916	0,054 82	3 375	6,820
500	0,068 49	3 434	6,977	0,056 59	3 422	6,882
520	0,070 55	3 480	7,036	0,058 34	3 469	6,942
540	0,072 59	3 526	7,093	0,060 08	3 516	7,000
560	0,074 61	3 572	7,149	0,061 79	3 563	7,057
580	0,076 62	3 618	7,204	0,063 49	3 609	7,112
600	0,078 62	3 665	7,258	0,065 18	3 656	7,166
620	0,080 60	3 711	7,310	0,066 86	3 703	7,220
640	0,082 58	3 757	7,362	0,068 53	3 750	7,272

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 80 bar			100 bar		
0	0,000 996 2	8,1	0,000 4	0,000 995 3	10,1	0,000 5
20	0,000 998 1	91,4	0,294 6	0,000 997 2	93,2	0,294 2
40	0,001 004	174,5	0,569 0	0,001 003	176,3	0,568 2
60	0,001 014	257,8	0,826 7	0,001 013	259,4	0,825 7
80	0,001 025	341,2	1,070	0,001 025	342,8	1,069
100	0,001 040	425,0	1,301	0,001 039	426,5	1,299
120	0,001 056	509,2	1,521	0,001 055	510,6	1,519
140	0,001 075	594,1	1,731	0,001 074	595,4	1,729
160	0,001 097	679,8	1,934	0,001 095	681,0	1,932
180	0,001 122	766,7	2,130	0,001 120	767,8	2,127
200	0,001 150	855,1	2,321	0,001 148	855,9	2,318
220	0,001 183	945,3	2,508	0,001 181	945,9	2,504
240	0,001 222	1 038	2,692	0,001 219	1 038	2,688
260	0,001 269	1 135	2,876	0,001 265	1 134	2,871
280	0,001 328	1 236	3,063	0,001 322	1 235	3,056
300	0,024 26	2 787	5,794	0,001 398	1 343	3,249
320	0,026 81	2 879	5,952	0,019 26	2 784	5,715
340	0,028 96	2 955	6,079	0,021 47	2 883	5,880
360	0,030 88	3 023	6,187	0,023 31	2 965	6,011
380	0,032 65	3 084	6,283	0,024 93	3 036	6,121
400	0,034 31	3 142	6,369	0,026 41	3 100	6,218
420	0,035 89	3 196	6,449	0,027 79	3 160	6,306
440	0,037 40	3 249	6,524	0,029 11	3 216	6,386
460	0,038 87	3 300	6,595	0,030 36	3 271	6,461
480	0,040 30	3 350	6,662	0,031 58	3 323	6,532
500	0,041 70	3 399	6,726	0,032 76	3 375	6,599
520	0,043 08	3 447	6,788	0,033 91	3 425	6,664
540	0,044 43	3 496	6,848	0,035 04	3 475	6,726
560	0,045 77	3 544	6,907	0,036 15	3 525	6,786
580	0,047 09	3 592	6,964	0,037 24	3 574	6,845
600	0,048 39	3 640	7,019	0,038 32	3 623	6,901
620	0,049 69	3 687	7,073	0,039 39	3 672	6,957
640	0,050 97	3 735	7,126	0,040 44	3 720	7,011

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v, specifična entalpija h, specifična entropija s

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p =	120 bar			160 bar	
0	0,000 994 3	12,1	0,000 6	0,000 992 3	16,1	0,000 8
20	0,000 996 3	95,1	0,293 7	0,000 994 6	98,8	0,292 8
40	0,001 003	178,0	0,567 4	0,001 001	181,6	0,565 9
60	0,001 012	261,1	0,824 6	0,001 010	264,5	0,822 5
80	0,001 024	344,4	1,067	0,001 022	347,6	1,065
100	0,001 038	428,0	1,298	0,001 036	431,0	1,295
120	0,001 054	512,1	1,517	0,001 052	514,9	1,514
140	0,001 073	596,7	1,727	0,001 070	599,4	1,723
160	0,001 094	682,2	1,929	0,001 091	684,6	1,925
180	0,001 118	768,8	2,125	0,001 115	771,0	2,120
200	0,001 146	856,8	2,315	0,001 142	858,6	2,309
220	0,001 178	946,6	2,500	0,001 174	947,9	2,494
240	0,001 216	1 039	2,684	0,001 210	1 039	2,676
260	0,001 261	1 134	2,866	0,001 254	1 134	2,856
280	0,001 317	1 234	3,050	0,001 307	1 233	3,038
300	0,001 390	1 341	3,240	0,001 374	1 337	3,224
320	0,001 494	1 461	3,445	0,001 467	1 452	3,421
340	0,016 19	2 795	5,675	0,001 618	1 588	3,646
360	0,018 11	2 898	5,841	0,011 04	2 717	5,463
380	0,019 69	2 982	5,971	0,012 87	2 851	5,673
400	0,021 08	3 055	6,081	0,014 27	2 951	5,824
420	0,022 36	3 121	6,178	0,015 46	3 034	5,946
440	0,023 55	3 182	6,265	0,016 53	3 108	6,050
460	0,024 67	3 240	6,345	0,017 51	3 175	6,143
480	0,025 75	3 296	6,420	0,018 42	3 237	6,227
500	0,026 79	3 350	6,491	0,019 29	3 297	6,305
520	0,027 79	3 402	6,558	0,020 13	3 355	6,379
540	0,028 77	3 454	6,622	0,020 93	3 410	6,448
560	0,029 73	3 505	6,684	0,021 71	3 465	6,514
580	0,030 68	3 556	6,744	0,022 46	3 518	6,578
600	0,031 60	3 606	6,802	0,023 20	3 571	6,639
620	0,032 52	3 656	6,859	0,023 93	3 623	6,698
640	0,033 42	3 705	6,914	0,024 64	3 675	6,755

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p =	200 bar			250 bar	
0	0,000 990 4	20,1	0,000 8	0,000 988 1	25,1	0,000 9
20	0,000 992 9	102,5	0,291 9	0,000 990 7	107,1	0,290 7
40	0,000 999 2	185,1	0,564 3	0,000 997 1	189,4	0,562 3
60	0,001 008	267,8	0,820 4	0,001 006	272,0	0,817 8
80	0,001 020	350,8	1,062	0,001 018	354,8	1,059
100	0,001 034	434,0	1,292	0,001 031	437,8	1,288
120	0,001 050	517,7	1,510	0,001 047	521,3	1,506
140	0,001 068	602,0	1,719	0,001 065	605,4	1,714
160	0,001 089	687,1	1,920	0,001 085	690,2	1,915
180	0,001 112	773,1	2,115	0,001 108	775,9	2,108
200	0,001 139	860,4	2,303	0,001 134	862,8	2,296
220	0,001 169	949,3	2,487	0,001 164	951,2	2,479
240	0,001 205	1 040	2,668	0,001 198	1 042	2,658
260	0,001 247	1 134	2,847	0,001 238	1 134	2,836
280	0,001 297	1 231	3,026	0,001 286	1 230	3,013
300	0,001 361	1 334	3,209	0,001 345	1 331	3,192
320	0,001 445	1 446	3,400	0,001 421	1 439	3,376
340	0,001 570	1 573	3,610	0,001 527	1 558	3,574
360	0,001 827	1 743	3,884	0,001 698	1 701	3,804
380	0,008 246	2 660	5,317	0,002 240	1 941	4,176
400	0,009 947	2 821	5,559	0,006 014	2 582	5,146
420	0,011 20	2 933	5,723	0,007 580	2 774	5,427
440	0,012 24	3 024	5,852	0,008 696	2 902	5,609
460	0,013 15	3 103	5,962	0,009 609	3 002	5,748
480	0,013 99	3 174	6,058	0,010 41	3 089	5,864
500	0,014 77	3 241	6,146	0,011 13	3 166	5,966
520	0,015 51	3 304	6,226	0,011 80	3 238	6,057
540	0,016 21	3 365	6,302	0,012 42	3 305	6,141
560	0,016 88	3 423	6,372	0,013 01	3 369	6,218
580	0,017 53	3 480	6,440	0,013 58	3 430	6,291
600	0,018 16	3 536	6,504	0,014 13	3 490	6,360
620	0,018 78	3 590	6,566	0,014 65	3 548	6,426
640	0,019 38	3 644	6,626	0,015 17	3 605	6,490

Zasićena para rashladnih tvari

Toplinska svojstva pri temperaturi t_s

tlak p; specifični volumen v', v''; specifična entalpija h', h''; specifična entropija s', s''

t_s °C	p bar	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
			Ugljični dioksid CO_2				
Krutina — para							
−100	0,139	0,000 627	2,336	−373	212	−1,676	1,704
− 80	0,896	0,000 639	0,398	−350	224	−1,549	1,422
− 60	4,10	0,000 657	0,091 2	−319	231	−1,400	1,180
− 56,6	5,18	0,000 661	0,072 2	−313	231	−1,371	1,140
Kapljevina — para							
− 56,6	5,18	0,000 849	0,072 2	−117	231	−0,467	1,140
− 50	6,84	0,000 867	0,055 4	−105	233	−0,410	1,101
− 40	10,05	0,000 897	0,038 2	− 85,4	235	−0,327	1,048
− 30	14,27	0,000 931	0,027 0	− 66,1	237	−0,248	0,998
− 25	16,81	0,000 950	0,022 9	− 56,5	237	−0,209	0,975
− 20	19,67	0,000 971	0,019 5	− 46,5	237	−0,170	0,951
− 15	22,89	0,000 994	0,016 6	− 36,0	237	−0,130	0,928
− 10	26,47	0,001 019	0,014 2	− 24,7	237	−0,089 2	0,905
− 5	30,45	0,001 048	0,012 1	− 13,0	236	−0,046 0	0,883
0	34,85	0,001 081	0,010 4	0	235	0	0,860
5	39,72	0,001 120	0,008 85	13,0	232	0,043 1	0,831
10	45,06	0,001 166	0,007 52	27,2	229	0,091 3	0,802
15	50,93	0,001 223	0,006 32	42,3	223	0,142	0,768
20	57,33	0,001 298	0,005 26	58,6	214	0,196	0,726
25	64,32	0,001 417	0,004 17	78,7	198	0,263	0,663
30	71,92	0,001 677	0,002 99	108	172	0,357	0,566
31	73,51	0,002 156	0,002 16	140	140	0,460	0,460
			Sumporni dioksid SO_2				
− 50	0,119	0,000 642	2,429	− 61,5	353	−0,252	1,607
− 40	0,218	0,000 652	1,378	− 50,2	359	−0,198	1,557
− 30	0,380	0,000 663	0,819	− 37,7	365	−0,146	1,509
− 20	0,635	0,000 674	0,507	− 25,5	370	−0,097 1	1,465
− 10	1,014	0,000 686	0,328	− 13,0	375	−0,049 8	1,423
0	1,554	0,000 697	0,220	0	379	0	1,388
10	2,296	0,000 710	0,154	13,4	383	0,050 7	1,357
20	3,284	0,000 723	0,108	27,2	387	0,101	1,328
30	4,566	0,000 738	0,079	41,0	391	0,150	1,302
40	6,186	0,000 754	0,059	55,7	393	0,197	1,277
50	8,189	0,000 772	0,045	69,9	396	0,245	1,254

t_s °C	p bar	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
			Amonijak NH_3				
−70	0,108	0,001 379	9,01	−310,2	1 154	−1,307	5,903
−60	0,219	0,001 401	4,70	−267,5	1 172	−1,103	5,653
−50	0,409	0,001 425	2,62	−225,2	1 189	−0,907 5	5,433
−40	0,718	0,001 449	1,55	−180,8	1 206	−0,713 7	5,237
−30	1,195	0,001 476	0,963	−136,5	1 222	−0,526 6	5,061
−25	1,516	0,001 490	0,772	−114,3	1 229	−0,435 3	4,980
−20	1,903	0,001 504	0,624	− 91,3	1 237	−0,345 8	4,902
−15	2,363	0,001 519	0,509	− 68,7	1 244	−0,257 4	4,827
−10	2,909	0,001 534	0,419	− 46,0	1 250	−0,170 4	4,756
− 5	3,549	0,001 550	0,347	− 23,0	1 256	−0,084 6	4,688
0	4,294	0,001 566	0,290	0	1 262	0	4,622
5	5,157	0,001 583	0,244	23,0	1 268	0,083 7	4,558
10	6,150	0,001 601	0,206	46,5	1 272	0,166 2	4,496
15	7,283	0,001 619	0,175	69,9	1 277	0,247 8	4,436
20	8,572	0,001 639	0,149	93,8	1 280	0,328 6	4,378
25	10,03	0,001 659	0,128	117,6	1 284	0,408 6	4,322
30	11,67	0,001 680	0,111	141,5	1 287	0,487 7	4,266
40	15,54	0,001 726	0,083 3	190,5	1 291	0,643 8	4,158
50	20,33	0,001 777	0,063 5	240,3	1 292	0,797 0	4,052
			Monoklormetan (metilklorid) CH_3Cl				
−30	0,772	0,000 986	0,528	− 46,0	388	−0,178 3	1,610
−20	1,177	0,001 004	0,354	− 31,0	394	−0,118 0	1,563
−10	1,750	0,001 022	0,241	− 15,5	400	−0,057 8	1,523
0	2,521	0,001 042	0,168	0	406	0	1,486
10	3,552	0,001 063	0,120	15,9	411	0,056 5	1,453
20	4,889	0.001 085	0,087 3	31,8	416	0,111 8	1,423
30	6,586	0,001 109	0,065 1	47,7	420	0,165 8	1,395
40	8,702	0,001 134	0,051 1	64,0	424	0,218 5	1,371
			Diklormetan (metilenklorid) CH_2Cl_2				
−20	0,0559	—	4,14	− 28,5	353	−0,112	1,399
−10	0,109	—	2,35	− 14,2	358	−0,053 2	1,363
0	0,188	—	1,42	0	363	0	1,331
10	0,299	—	0,92	14,2	368	0,047 7	1,297
20	0,469	0,000 749	0,61	28,5	372	0,091 3	1,263
30	0,693	—	0,417	44,0	377	0,131	1,232

Zasićena para rashladnih tvari (nastavak)

Toplinska svojstva pri temperaturi t_s

tlak p; specifični volumen v', v''; specifična entalpija h', h''

t_s °C	p bar	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
		R 11 — monofluortriklormetan $CFCl_3$			
− 40	0,051	0,000 616 7	2,760	− 33,20	170,3
− 30	0,092	0,000 625 0	1,533	− 25,00	175,3
− 20	0,157	0,000 633 5	0,963	− 16,71	180,3
− 10	0,256	0,000 642 5	0,616	− 8,374	185,3
0	0,402 1	0,000 651 9	0,405	0,000	190,4
10	0,605 6	0,000 661 9	0,277	8,457	195,5
20	0,886 5	0,000 672 2	0,194	17,04	200,5
30	1,261	0,000 683 3	0,140	25,71	205,5
40	1,748	0,000 695 0	0,103	34,50	210,5
50	2,357	0,000 707 5	0,077	43,46	215,3
		R 12 — difluordiklormetan CF_2Cl_2			
− 70	0,123 4	0,000 623 4	1,126	− 59,29	120,9
− 0	0,227 0	0,000 634 9	0,639 4	− 51,58	125,6
− 50	0,392 2	0,000 646 8	0,385 4	− 43,58	130,5
− 40	0,642 4	0,000 659 2	0,244 1	− 35,38	135,5
− 30	1,005	0,000 672 5	0,161 3	− 26,92	140,4
− 20	1,510	0,000 686 8	0,110 7	− 18,21	145,3
− 10	2,191	0,000 701 8	0,078 13	− 9,211	150,2
0	3,086	0,000 717 3	0,056 67	0,000	154,9
10	4,230	0,000 734 2	0,042 04	9,462	159,4
20	5,667	0,000 752 4	0,031 75	19,22	163,8
30	7,434	0,000 773 4	0,024 33	29,18	167,8
40	9,582	0,000 796 8	0,018 82	39,40	171,4
		R 13 — trifluormonoklormetan CF_3Cl			
−100	0,332 6	0,000 626	0,407 0	−100,5	57,99
− 80	1,098	0,000 658	0,134 2	− 82,86	66,40
− 60	2,817	0,000 695	0,055 42	− 64,18	74,44
− 50	4,204	0,000 717	0,037 74	− 54,30	78,13
− 40	6,051	0,000 741	0,026 42	− 44,00	81,56
− 30	8,394	0,000 769	0,018 89	− 33,45	84,53
− 20	11,43	0,000 802	0,013 73	− 22,57	86,96
− 10	15,15	0,000 842	0,010 10	− 11,43	88,84
0	19,70	0,000 894	0,007 47	0,000	89,93
10	25,19	0,000 962	0,005 49	12,52	89,68
20	31,78	0,001 079	0,003 829	28,26	86,21

t_s °C	p bar	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
		R 13 B 1 — trifluormonobrommetan CF_3Br			
−100	0,077 18	0,000 462 0	1,246	− 66,57	61,96
− 80	0,305 0	0,000 479 5	0,347 7	− 54,85	69,50
− 60	0,908 1	0,000 499 6	0,126 2	− 42,71	76,20
− 50	1,445	0,000 510 8	0,081 8	− 36,01	79,55
− 40	2,200	0,000 523 1	0,055 11	− 29,31	82,90
− 30	3,222	0,000 536 6	0,038 35	− 22,19	86,25
− 20	4,568	0,000 551 5	0,027 42	− 15,07	88,76
− 10	6,292	0,000 568 2	0,020 04	− 7,536	91,69
0	8,454	0,000 587 2	0,014 91	0,000	94,20
10	11,12	0,000 609 2	0,011 25	7,955	96,30
20	14,35	0,000 635 2	0,008 559	16,33	98,39
30	18,22	0,000 667 1	0,006 536	24,70	99,65
40	22,83	0,000 708 4	0,004 969	33,49	100,5
		R 21 — monofluordiklormetan $CHFCl_2$			
− 20	0,283 5	0,000 679 8	0,716 9	− 20,56	236,6
− 10	0,457 6	0,000 690 3	0,458 7	− 10,30	241,7
0	0,708 6	0,000 701 4	0,305 3	0,000	246,7
10	1,059	0,000 713 1	0,210 3	10,47	252,2
20	1,532	0,000 725 5	0,149 1	20,89	257,2
30	2,156	0,000 738 6	0,108 4	31,48	262,4
40	2,959	0,000 752 5	0,080 4	42,20	267,4
50	3,970	0,000 767 2	0,060 7	53,00	271,2
		R 22 — difluormonoklormetan CHF_2Cl			
−100	0,020 6	0,000 640 9	8,340	−108,4	158,8
− 80	0,103 0	0,000 661 2	1,775	− 87,34	168,7
− 60	0,374 6	0,000 682 4	0,535	− 66,36	178,9
− 50	0,647 2	0,000 695 0	0,323	− 55,68	183,8
− 40	1,055	0,000 708 6	0,205	− 44,92	188,9
− 30	1,647	0,000 723 5	0,135	− 33,91	193,6
− 20	2,461	0,000 740 5	0,092 9	− 22,69	198,2
− 10	3,560	0,000 758 2	0,065 4	− 11,51	202,9
0	5,001	0,000 778 5	0,047 1	0,000	207,0
10	6,855	0,000 800 4	0,034 6	12,64	210,8
20	9,169	0,000 824 4	0,025 8	25,67	214,1
30	12,02	0,000 850 1	0,019 4	39,52	216,8
40	15,48	0,000 883 0	0,014 8	53,47	218,2

Promjene stanja pare

računamo pomoću tablica odnosno dijagrama za vodenu paru (Oznake veličine – v. str. 157 do 160 i 168).

a) Izohora V = konst $v = 1/\varrho = V/m$ = konst

Za određeni tlak p uz odgovarajuće vrijednosti v' i v'' vrijedi:

$v < v'$ – tekućina
$v' < v < v''$ – mokra para
$v'' < v$ – pregrijana para

Odgovarajuće temperature i ostale veličine određujemo iz tablica ili dijagrama.

Apsolutni rad $A = 0$
Toplina $Q = m(h_2 - h_1) - V(p_2 - p_1)$

b) Izobara i izoterma

U području mokre pare svakom tlaku p odgovara točno određena temperatura T_s. Izobara je, dakle, ovdje identična s izotermom, dok se izvan područja *mokre* pare od nje bitno razlikuje.

p = konst	Apsolutni rad	$A = p(V_2 - V_1)$
	Toplina	$Q = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1)$
T = konst	Apsolutni rad	$A = \int p\,dV$
	Toplina	$Q = T(S_2 - S_1) = mT(s_2 - s_1)$

c) Izentropa

Kao kod plinova, upotrebljavamo i kod para za izentropu jednadžbu

$$pV^{\varkappa} = \text{konst}$$

gdje je $\varkappa$ samo empirijski određena vrijednost i nije ni u kojoj vezi sa specifičnim toplinskim kapacitetima c_p i c_v (u zasićenom je području $c_p = \infty$).

Vrijednost $\varkappa$ iznosi za vodenu paru:
u pregrijanom području ($p < 25$ bar) $\varkappa = 1{,}30$
u zasićenom području
– za suho zasićenu paru ($x = 1$) $\varkappa = 1{,}135$
– za mokru paru ($x > 0{,}75$) $\varkappa = 1{,}035 + 0{,}1x$

d) Prigušivanje pare h = konst

Za razliku od plinova, za koje pri prigušivanju vrijedi T = konst, temperatura se pare pri prigušivanju mijenja (»Joule-Thomsonov efekt«)

$$T \neq \text{konst}$$

Ispod određene temperature (»temperatura inverzije«) temperatura pare pri prigušivanju pada, a iznad nje raste. Temperatura inverzije iznosi šesterostruku do sedmerostruku vrijednost kritične temperature (K).

SMJESE PLINOVA I PARA

Ukupni tlak smjese jednak je zbroju parcijalnih tlakova sastavina smjese (kao kod smjesa plinova – vidi str. 167).

Po Daltonovu je zakonu smjesa pare i plina u ravnoteži s tekućinom koja ishlapljuje kada parcijalni tlak pare p' dosegne tlak zasićene pare p_s pri odgovarajućoj temperaturi. To je stanje zasićenosti smjese.

Stanje zasićenosti se narušava promjenom temperature. Pri povećanju temperature raste tlak zasićene pare ($p_s > p'$), smjesa postaje nezasićenom (a para u njoj pregrijanom), te je sposobna primiti nove količine pare koje počinje ishlapljivati iz tekućine (sušenje). Pri padu temperature pada i tlak zasićene pare ($p_s < p'$), smjesa više ne može zadržati sve količine pare pa se iz smjese počinje izlučivati suvišak tekućine (rošenje).

Smjesa zraka i vodene pare (vlažan zrak)

Vlažnost x (apsolutna vlaga) je omjer vodene pare m_v i mase suhog zraka m_z u vlažnom zraku

$$x = m_v/m_z = (R_z/R_v)p'/(p - p') = 0{,}622\,p'/(p - p')$$

Plinske konstante za zrak i vodenu paru

$R_z = 0{,}287$ kJ/kgK $R_v = R_m/m_m = 8{,}314/18 = 0{,}462$ kJ/kgK

p' je parcijalni tlak vodene pare, p je ukupni tlak smjese, $p - p' = p_z$ je parcijalni tlak suhog zraka.

Vlažnost pri zasićenju ($p' = p_s$): $x_s = 0{,}622\,p_s/(p - p_s)$
Stupanj zasićenosti $\psi = x/x_s$

Relativna vlažnost φ jest omjer parcijalnog tlaka vodene pare p' i tlaka zasićenja p_s $\varphi = p'/p_s$ $(\approx \psi)$

Specifična entalpija smjese (kJ/kg*) u nezasićenom području s obzirom na izhodište pri ledištu vode, (gdje je $h = 0$) bit će

$$h = c_{pz}t + x(c_{pv}t + r)$$

gdje znače:
– specifični toplinski kapacitet zraka $c_{pz} = 1{,}005$ kJ/kgK
– specifični toplinski kapacitet vodne pare $c_{pv} = 1{,}926$ kJ/kgK
– toplina isparivanja vode (pri 0 °C) $r = 2500$ kJ/kg

t je temperatura u °C pa je

$$h = 1{,}005\,t + x\,(1{,}926\,t + 2500)$$

Pri potpunom zasićenju ($p' = p_s$, $x = x_s$) je $h = h_s$.

Toplinska svojstva suhoga i zasićenoga zraka pri raznim temperaturama su sabrana na str. 194, za vlažni zrak (nezasićen) na str. 195 do 197. Sve se promjene stanja vlažnog zraka najbolje mogu pratiti u Mollierovu h, x – dijagramu za vlažni zrak (str. 198).

* Specifična vrijednost odnosi se na 1 kg suhog zraka u vlažnoj smjesi, odn. na $(1 + x)$ kg vlažne smjese.

Suhi i zasićeni vlažni zrak

Toplinska svojstva pri temperaturi t

parcijalni tlak pare p_s, vlažnost x, spec. entalpija h, spec. volumen v

t °C	Zasićeni vlažni zrak p_s mbar	x kg/kg	h kJ/kg	v m³/kg	Suhi zrak h kJ/kg	v m³/kg
−20	1,031	0,000 642	−18,53	0,727	−20,11	0,727
−18	1,248	0,000 777	−16,18	0,733	−18,10	0,733
−16	1,505	0,000 938	−13,77	0,739	−16,09	0,738
−14	1,810	0,001 128	−11,29	0,745	−14,08	0,744
−12	2,171	0,001 353	− 8,71	0,750	−12,07	0,750
−10	2,596	0,001 619	− 6,04	0,756	−10,06	0,756
− 8	3,097	0,001 932	− 3,24	0,762	− 8,04	0,761
− 6	3,684	0,002 300	− 0,31	0,768	− 6,03	0,767
− 4	4,371	0,002 731	+ 2,78	0,774	− 4,02	0,773
− 2	5,172	0,003 234	6,06	0,780	− 2,01	0,778
0	6,106	0,003 821	9,55	0,786	0	0,784
2	7,055	0,004 419	13,08	0,792	2,01	0,790
4	8,129	0,005 098	16,80	0,798	4,02	0,796
6	9,345	0,005 868	20,77	0,804	6,03	0,801
8	10,72	0,006 740	24,99	0,810	8,04	0,807
10	12,27	0,007 727	29,52	0,817	10,06	0,813
12	14,01	0,008 841	34,36	0,823	12,07	0,819
14	15,97	0,010 10	39,58	0,829	14,08	0,824
16	18,17	0,011 51	45,20	0,836	16,09	0,830
18	20,62	0,013 10	51,28	0,842	18,10	0,836
20	23,37	0,014 88	57,87	0,849	20,11	0,842
22	26,42	0,016 88	65,01	0,856	22,12	0,847
24	29,82	0,019 12	72,78	0,863	24,13	0,853
26	33,60	0,021 62	81,25	0,870	26,14	0,859
28	37,78	0,024 42	90,49	0,877	28,15	0,865
30	42,42	0,027 55	100,6	0,885	30,17	0,870
32	47,53	0,031 04	111,6	0,892	32,18	0,876
34	53,18	0,034 94	123,7	0,900	34,19	0,882
36	59,40	0,039 28	137,0	0,908	36,20	0,888
38	66,24	0,044 12	151,6	0,916	38,21	0,893
40	73,75	0,049 53	167,7	0,925	40,22	0,899
42	81,99	0,055 55	185,5	0,934	42,23	0,905
44	91,00	0,062 27	205,0	0,943	44,24	0,911
46	100,9	0,069 77	226,7	0,953	46,25	0,916
48	111,6	0,078 15	250,6	0,963	48,26	0,922
50	123,4	0,087 52	277,2	0,973	50,28	0,928
55	157,4	0,116 2	357,7	1,002	55,30	0,942
60	199,2	0,154 7	464,5	1,034	60,33	0,957
65	250,1	0,207 4	609,1	1,072	65,36	0,971
70	311,6	0,281 6	811,1	1,117	70,39	0,985
75	385,5	0,390 2	1 106	1,170	75,41	1,000
80	473,6	0,559 6	1 563	1,235	80,44	1,014
85	578,0	0,852 1	2 351	1,316	85,47	1,028
90	701,1	1,459	3 983	1,418	90,50	1,043
95	845,3	3,398	9 193	1,553	95,52	1,057

Vlažni zrak

Toplinska svojstva pri temperaturi t

Parcijalni tlak pare p' (mbar), vlažnost x (g/kg suhoga zraka), specifična entalpija vlažnoga zraka h (kJ/(1 + x) kg vlažnoga zraka)

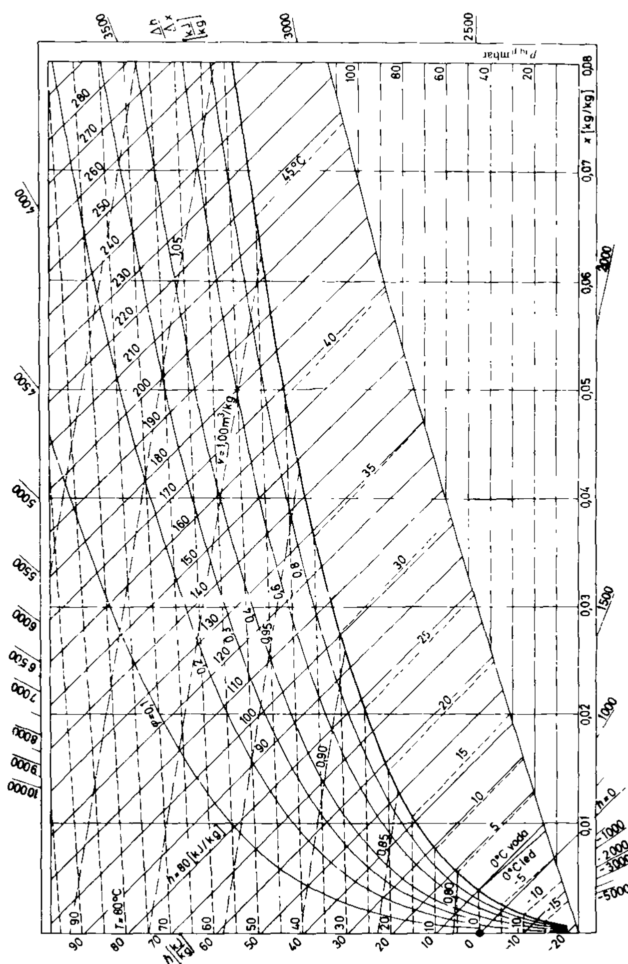
t °C		Relativna vlažnost φ 0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	p'	0,61	1,22	1,83	2,44	3,06	3,67	4,28	4,89	5,50	6,11
	x	0,38	0,76	1,14	1,52	1,91	2,29	2,67	3,06	3,44	3,82
	h	0,95	1,90	2,85	3,80	4,75	5,70	6,65	7,60	8,55	9,55
2	p'	0,71	1,41	2,12	2,82	3,53	4,23	4,94	5,64	6,35	7,05
	x	0,44	0,88	1,32	1,76	2,20	2,64	3,09	3,53	3,97	4,42
	h	3,10	4,20	5,30	6,40	7,50	8,60	9,73	10,8	11,9	13,1
4	p'	0,81	1,63	2,44	3,25	4,07	4,88	5,69	6,50	7,32	8,13
	x	0,50	1,02	1,52	2,03	2,54	3,05	3,56	4,07	4,59	5,10
	h	5,25	6,55	7,81	9,09	10,4	11,6	12,9	14,2	15,5	16,8
6	p'	0,93	1,87	2,81	3,74	4,68	5,61	6,55	7,48	8,42	9,35
	x	0,58	1,17	1,75	2,34	2,92	3,51	4,10	4,69	5,28	5,87
	h	7,45	8,93	10,4	11,9	13,3	14,8	16,3	17,8	19,3	20,7
8	p'	1,07	2,14	3,22	4,29	5,36	6,43	7,50	8,58	9,65	10,72
	x	0,67	1,33	2,01	2,68	3,35	4,03	4,70	5,38	6,06	6,74
	h	9,68	11,3	13,1	14,7	16,4	18,1	19,8	21,5	23,2	25,0
10	p'	1,23	2,45	3,68	4,91	6,14	7,36	8,59	9,82	11,04	12,27
	x	0,77	1,53	2,30	3,07	3,84	4,61	5,39	6,17	6,94	7,73
	h	11,9	13,9	15,8	17,7	19,7	21,6	23,6	25,5	27,5	29,5
12	p'	1,40	2,80	4,20	5,60	7,01	8,41	9,81	11,2	12,6	14,0
	x	0,87	1,75	2,62	3,50	4,39	5,28	6,16	7,05	7,94	8,84
	h	14,2	16,4	18,6	20,8	23,1	25,3	27,5	29,8	32,0	34,3
14	p'	1,60	3,20	4,80	6,40	8,00	9,60	11,2	12,8	14,4	16,0
	x	1,00	2,00	3,00	4,01	5,02	6,03	7,05	8,06	9,09	10,1
	h	16,5	19,1	21,6	24,1	26,7	29,2	31,8	34,4	37,0	39,5

Vlažni zrak (nastavak)

Toplinska svojstva pri temperaturi t

Parcijalni tlak pare p' (mbar), vlažnost x (g/kg suhoga zraka), specifična entalpija h (kJ/(1 + x) kg vlažnoga zraka)

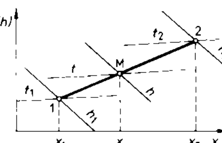
t °C		Relativna vlažnost φ									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	p'	1,81	3,63	5,45	7,27	9,09	10,9	12,7	14,5	16,4	18,2
16	x	1,13	2,27	3,41	4,56	5,71	6,85	8,00	9,15	10,3	11,5
	h	18,9	21,7	24,6	27,5	30,4	33,3	36,2	39,1	42,1	45,1
	p'	2,06	4,12	6,19	8,25	10,3	12,4	14,4	16,5	18,6	20,6
18	x	1,28	2,57	3,87	5,17	6,47	7,81	9,09	10,4	11,8	13,1
	h	21,2	24,5	27,8	31,1	34,4	37,8	41,0	44,3	47,9	51,2
	p'	2,34	4,67	7,01	9,35	11,7	14,0	16,4	18,7	21,0	23,4
20	x	1,46	2,92	4,39	5,87	7,36	8,83	10,4	11,9	13,3	14,9
	h	23,7	27,4	31,1	34,9	38,7	42,4	46,4	50,2	53,7	57,8
	p'	2,64	5,28	7,93	10,6	13,2	15,9	18,5	21,1	23,8	26,4
22	x	1,65	3,30	4,97	6,66	8,32	10,1	11,7	13,4	15,2	16,9
	h	26,2	30,4	34,6	38,9	43,1	47,7	51,7	56,0	60,6	64,9
	p'	2,98	5,96	8,95	11,9	14,9	17,9	20,9	23,9	26,8	29,8
24	x	1,86	3,73	5,62	7,49	9,41	11,3	13,3	15,2	17,1	19,1
	h	28,7	33,5	38,3	43,1	47,9	52,8	57,8	62,7	67,5	72,6
	p'	3,36	6,72	10,1	13,4	16,8	20,2	23,5	26,9	30,2	33,6
26	x	2,10	4,21	6,35	8,45	10,6	12,8	15,0	17,2	19,4	21,6
	h	31,3	36,7	42,2	47,5	53,0	58,6	64,2	69,8	75,4	81,1
	p'	3,78	7,56	11,3	15,1	18,9	22,7	26,4	30,2	34,0	37,8
28	x	2,36	4,74	7,11	9,54	12,0	14,5	16,9	19,4	21,9	24,4
	h	34,0	40,1	46,1	52,3	58,6	65,0	71,1	77,5	83,9	90,3
	p'	4,24	8,48	12,7	17,0	21,2	25,4	29,7	33,9	38,2	42,4
30	x	2,65	5,32	8,00	10,8	13,5	16,2	19,0	21,8	24,7	27,5
	h	36,8	43,6	50,4	57,6	64,5	71,4	78,6	85,7	93,1	100,3
	p'	4,75	9,51	14,3	19,0	23,8	28,5	33,3	38,0	42,8	47,5
32	x	2,97	5,97	9,02	12,1	15,2	18,3	21,4	24,6	27,8	31,1
	h	39,6	47,3	55,1	63,0	70,9	78,8	86,8	95,0	103,2	111,3
	p'	5,32	10,6	16,0	21,3	26,6	31,9	37,2	42,5	47,9	53,2
34	x	3,33	6,66	10,1	13,5	17,0	20,5	24,0	27,6	31,3	34,9
	h	42,5	51,1	59,9	68,6	77,6	86,5	95,5	104,7	114,2	123,7
	p'	5,94	11,9	17,8	23,8	29,7	35,6	41,6	47,8	53,5	59,4
36	x	3,72	7,49	11,3	15,2	19,0	23,0	27,0	31,2	35,2	39,3
	h	45,5	55,2	65,0	75,0	84,8	95,0	105,3	116,1	126,4	136,9
	p'	6,62	13,2	19,9	26,5	33,1	39,7	46,4	53,0	59,6	66,2
38	x	4,15	8,32	12,6	16,9	21,3	25,7	30,3	34,8	39,4	44,1
	h	48,7	59,4	70,4	81,4	92,8	104,1	115,9	127,5	139,3	151,4
	p'	7,38	14,8	22,1	29,5	36,9	44,3	51,6	59,0	66,4	73,8
40	x	4,62	9,34	14,1	18,9	23,8	28,8	33,8	39,0	44,2	49,5
	h	51,9	64,0	76,3	88,7	101,3	114,1	127,0	140,4	153,8	167,7
	p'	8,20	16,4	24,6	32,8	41,0	49,2	57,4	65,6	73,8	82,0
42	x	5,14	10,4	15,7	21,1	26,6	32,2	37,9	43,7	49,6	55,5
	h	55,3	68,8	82,5	96,4	110,6	125,0	139,7	154,7	169,9	185,3
	p'	9,10	18,2	27,3	36,4	45,5	54,6	63,7	72,8	81,9	91,0
44	x	5,71	11,5	17,5	23,5	29,7	35,9	42,3	48,8	55,5	62,3
	h	58,7	73,7	89,2	104,7	120,7	136,8	153,2	170,0	187,3	204,9
	p'	10,1	20,2	30,3	40,3	50,4	60,5	70,6	80,7	90,8	100,8
46	x	6,35	12,8	19,4	26,1	33,0	40,1	47,3	54,6	62,1	69,8
	h	62,4	79,1	96,2	113,5	131,3	149,7	168,3	187,2	206,6	226,2
	p'	11,2	22,3	33,5	44,6	55,8	67,0	78,1	89,3	100,4	111,6
48	x	7,05	14,2	21,6	29,0	36,8	44,7	52,7	61,0	69,4	78,1
	h	66,3	84,8	103,9	123,1	143,3	163,7	184,5	206,0	227,7	250,2
	p'	12,3	24,7	37,0	49,3	61,7	74,0	86,3	98,7	111,0	123,3
50	x	7,75	15,8	23,9	32,3	40,9	49,7	58,8	68,1	77,7	87,5
	h	70,1	91,0	112,0	133,8	156,1	178,9	202,5	226,6	251,5	276,9



Mollierov dijagram h, x za vlažni zrak

Promjene stanja vlažnoga zraka

1. *Miješanje vlažnoga zraka s vlažnim zrakom drugačije vlažnosti*



Miješa li se vlažni zrak, mase suhoga zraka m_1, temperature t_1 i vlažnosti x_1 (stanje u točki 1) s vlažnim zrakom, mase suhoga zraka m_2, temperature t_2 i vlažnosti x_2 (stanje u točki 2), to će se za smjesu proračunati:

– vlažnost	$x = (m_1 x_1 + m_2 x_2)/(m_1 + m_2)$
– specifična entalpija	$h = (m_1 h_1 + m_2 h_2)/(m_1 + m_2)$
– temperatura u °C	$t = (h - x r)/(c_{pz} + x c_{pv}) =$
	$= (h - 2500\, x)/(1{,}005 + 1{,}926\, x)$

Sve se te veličine mogu direktno očitati iz dijagrama h, x za stanje smjese u točki M, koja je određena omjerom $\overline{M2}/\overline{M1} = m_1/m_2$.

2. *Promjena stanja pri x = konst (izohigra)*

Pri zagrijavanju (od stanja 1 do 2) ugrije se vlažni zrak za temperaturnu razliku $t_2 - t_1$ a specifična se entalpija povećava od h_1 do h_2, pa je stoga potrebno dovoditi toplinu

$$Q = m_z(h_2 - h_1)$$

m_z je masa suhoga zraka.

Pri hlađenju među istim stanjima vlažnoga zraka (od 2 do 1) valja istu količinu topline Q odvesti.

3. *Hlađenje do temperature pod rosištem*

Pri hlađenju rashladnom površinom, koja ima temperaturu t_0 nižu od temperature rosišta (R), može se smatrati da je nastalo miješanje vlažnog zraka stanja 2 i graničnog sloja na rashladnoj površini stanja R_0, pri čemu se vlažni zrak ohladi do temperature t' ($< t_1$), a time i osuši. Vlažnost se smanjila od x do x', jer se izlučila masa vode $m_z(x - x')$. Odvesti treba toplinu

$$Q = m_z[h_2 - h' - (x - x')t]$$

t je konačna temperatura u °C.

4. *Vlaženje vodom ili vodenom parom*

Dodavanjem mase m_v vode ili vodene pare, specifične entalpije h_v vlažnom zraku, mase suhoga zraka m_z, vlažnosti x_1 i specifične entalpije h_1, dobivamo:

– vlažnost smjese	$x_2 = x_1 + m_v/m_z$
– specifičnu entalpiju smjese	$h_2 = h_1 + h_v m_v/m_z$

STRUJANJE PLINOVA I PARA

Pri stacionarnom strujanju (pri kojem se na bilo kojem mjestu brzina ne mijenja s vremenom ni po veličini ni po smjeru) protok mase je q_m konstantan, dok su druge veličine promjenljive od mjesta do mjesta.

Jednadžba kontinuiteta stacionarnog strujanja povezuje presjek A, brzinu v i gustoću ϱ

$$q_m = A\,v\,\varrho = \text{konst}$$

Pretvorba energije pri strujanju

Ako u prvom glavnom zakonu termodinamike (vidi str. 160) uzmemo u obzir i promjenu kinetičke energije W_k, vrijedi

$$dQ - dW = dH + dW_k$$

gdje je: Q – dovedena ili odvedena toplina, W – dobiveni ili utrošeni tehnički rad, H – entalpija.

Pri procesima strujanja, gdje ne dobivamo niti trošimo rad ($dW = 0$), vrijedi $dQ - dH = dW_k$, a pri izentropskom procesu ($dQ = 0$) još i $-dH = dW_k$, odnosno izraženo specifičnom entalpijom h i brzinama v

$$-dh = v\,dv \qquad h_1 - h_2 = (v_2^2 - v_1^2)/2$$

Bernoullijeva jednadžba za plinove i pare vrijedi za male razlike tlakova $\Delta p = p_1 - p_2$, u kojoj možemo računati sa zanemarljivo malom promjenom gustoće, tj. s prosječnom gustoćom $\varrho_{med} \approx$ konst (sličnost s nestlačivim fluidom)

$$p_1 + \varrho_{med}(v_1^2/2) = p_2 + \varrho_{med}(v_2^2/2)$$

Brzina istjecanja

Teoretska brzina istjecanja v_0 (bez trenja) iznosi (za $v_1 = 0$ i $v_2 = v_0$):

a) pri svim razlikama tlakova $\quad v_0 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$

b) pri malim razlikama tlakova ($\varrho \approx$ konst) $\quad v_0 = \sqrt{2(p_1 - p_2)/\varrho}$

Stvarna brzina istjecanja v je zbog trenja o stijenke i čestica fluida među sobom nešto manja

$$v = \varphi\,v_0$$

gdje je φ – koeficijent brzine (= 0,95 . . . 0,98 u dobro zaobljenih sapnica).

Korisnost pri istjecanju s koeficijentom φ je $\eta = \varphi^2$.

Količina istjecanja

Količina istjecanja (protok) mase $q_m = \alpha A_0 v_0 \varrho$ iznosi:

a) pri svim razlikama tlakova $\quad q_m = \alpha A_0 \varrho \sqrt{2(h_1 - h_2)}$

b) pri malim razlikama tlakova ($\varrho \approx$ konst) $\quad q_m = \alpha A_0 \sqrt{2\varrho(p_1 - p_2)}$

A_0 je čisti presjek otvora sapnice, α je produkt koeficijenta smanjenja presjeka (kontrakcije) mlaza μ i koeficijenta brzine φ.

Istjecanje iz sapnica

Brzina istjecanja v_0 se povećava ako se povećava razlika tlakova $p_1 - p_2$ i postiže najveću vrijednost v_z (»Lavalova brzina«) pri kritičkom omjeru tlakova

$$p_z/p_1 = [2/(\varkappa + 1)]^{\varkappa/(\varkappa - 1)}$$

Taj kritični omjer tlakova ovisi samo o fluidu ($\varkappa$) i iznosi za različite fluide:

	$\varkappa$	p_z/p_1
dvoatomni plinovi	1,40	0,530
pregrijana vodena para	1,30	0,546
zasićeni vodena para	1,135	0,577

Pri kritičnom omjeru tlakova p_z/p_1 postignuta brzina v_z jednaka je brzini zvuka i najveća je brzina koja se može pojaviti u najužem presjeku sapnice

$$v_z = \sqrt{\varkappa p_z/\varrho_z}$$

S pomoću jednadžbe stanja plina možemo pisati još i

$$\varrho_z/\varrho_1 = [2/(\varkappa + 1)]^{1/(\varkappa - 1)} \qquad T_z/T_1 = 2/(\varkappa + 1)$$

$$v_z = \sqrt{2[\varkappa/(\varkappa + 1)] \cdot (p_1/\varrho_1)} = \sqrt{2[\varkappa/(\varkappa + 1)]RT_1}$$

gdje su temperatura, tlak i gustoća ispred sapnice T_1, p_1, ϱ_1, a u najužem presjeku sapnice T_z, p_z, ϱ_z.

Najveći protok mase q_{max} koji protječe najužim presjekom A_{min} pri kritičnom omjeru tlakova p_z/p_1 iznosi

$$q_{max} = \alpha A_{min} \sqrt{p_1 \varrho_1 \varkappa [2/(\varkappa + 1)]^{(\varkappa + 1)/(\varkappa - 1)}}$$

gdje je α koeficijent istjecanja i iznosi:

kod dobro izvedenih sapnica $\quad \alpha = 0,95 \ldots 0.98$

pri oštrim rubovima $\quad \alpha = 0,64 \ldots 0,65$

Proširena sapnica (De Laval)

Stanje u najužem presjeku je određeno kritičnim omjerom tlakova p_z/p_1 i Lavalovom brzinom $v_z = \sqrt{2(h_1 - h_z)}$, a u konačnom presjeku tlakom p_2 i brzinom $v_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$.

Prigušivanje

Pri prigušivanju se suma energija ne mijenja

$$h_1 + v_1^2/2 = h_2 + v_2^2/2$$

Ako je brzina strujanja malena te je možemo zanemariti (pri običnom strujanju u cijevima, armaturama, stapnim strojevima itd.), možemo pisati h = konst. U (idealnim) plinovima je tada T = konst, a u para $T \neq$ konst (str. 192).

IZGARANJE

Izgaranje je ekzotermni proces oksidacije goriva pri kojem se razvija ogrjevna toplina H_s.

Goriva su većinom organski spojevi sastavljeni uglavnom od ugljika C, vodika H, sumpora S, kisika O, dušika N te pepela (p) i vlage (v).

Sastav goriva određujemo s obzirom na jedinicu količine

— za kruta i tekuća goriva s obzirom na jedinicu mase

$$C' + H' + S' + O' + N' + p' + v' = 1 \text{ (kg/kg goriva)}$$

— za plinovita goriva obično s obzirom na jedinicu volumena

$$H_2' + CO' + CO_2' + O_2' + N_2' + CH_4' + C_2H_4' + H_2O' = 1 \text{ (m}^3\text{/m}^3 \text{ goriva)}$$

Procesi izgaranja osnovnih sastavina krutih i tekućih goriva

ugljika	— potpuno izgaranje	$C + O_2 = CO_2$
	— nepotpuno izgaranje	$2\,C + O_2 = 2\,CO$
vodika		$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O$
sumpora		$S + O_2 = SO_2$

Potreba kisika odnosno zraka

a) U krutih i tekućih goriva iznosi najmanja potrebna količina kisika

$$O_{min} = C'/12 \cdot \sigma \quad \text{kmol/kg goriva}$$

σ = »karakteristika goriva«: $\sigma = 1 + 3\,[H' - (O' - S')/8]/C'$

U krutih je goriva $0 < \sigma < 1{,}2$ (u čistog ugljika: $\sigma = 1$; u ugljena: $\sigma = 1{,}1 \ldots 1{,}2$); u tekućih goriva je $\sigma > 1{,}2$ (u teških: $\sigma = 1{,}2 \ldots 1{,}3$; u lakih: $\sigma < 1{,}6$).

b) U plinovitih goriva iznosi najmanja potrebna količina kisika

$$O_{min} = H_2'/2 + CO'/2 + 2\,CH_4' + 3\,C_2H_4' - O_2' \quad \text{kmol/kmol goriva}$$

Najmanja količina zraka $Z_{min} = O_{min}/0{,}21$

Stvarna količina zraka $Z = \lambda\, Z_{min}$

gdje »faktor pretička zraka λ« iznosi:

za ručna ložišta	$\lambda = 1{,}6 \ldots 2{,}0$
za mehanička ložišta	$\lambda = 1{,}3 \ldots 1{,}6$
za ložišta na ulje i ugljenu prašinu	$\lambda = 1{,}2 \ldots 1{,}4$
za plinska ložišta	$\lambda = 1{,}05 \ldots 1{,}2$

Količina dimnih plinova

a) U krutih i tekućih goriva nastaje dimnih plinova (kmol/kg goriva)

$$D = \lambda/0{,}21 \cdot C'/12 \cdot \sigma + (H'/4 + O'/32 + N'/28 + v'/18)$$

b) U plinovitih goriva nastaje dimnih plinova (kmol/kmol goriva)

$$D = \lambda/0{,}21 \cdot O_{min} + (H_2'/2 + CO'/2 + CO_2' + N_2' + CH_4' + C_2H_4' + O_2')$$

Ogrjevne moći

a) Gornja ogrjevna moć H_s (gornja kalorična vrijednost) je sva toplina razvijena pri izgaranju.

b) Donja ogrjevna moć H_i (donja kalorična vrijednost) je onaj dio gornje ogrjevne moći koji dobivamo kad dimne plinove ohladimo samo do temperature iznad rosišta vodene pare (i para sumporne kiseline, ukoliko gorivo sadrži sumpor). Razlikuje se od gornje ogrjevne moći time što dimni plinovi sadrže i vodu (H_2O'' – v. str. 204).

Ogrjevnu moć (kaloričnu vrijednost) mjerimo s obzirom na jedinicu količine goriva:

za kruta i tekuća goriva	kJ/kg
za plinovita goriva	kJ/m³ (0 °C; 1,01325 bar)

Donja je ogrjevna moć manja od gornje za toplinu isparivanja r vodene pare (pri 0 °C):

r = 45000 kJ/kmol = 2500 kJ/kg = 2000 kJ/m³ (0 °C; 1,01325 bar)

Donje ogrjevne moći sastavina goriva

Sastavina goriva		kJ/kmol	kJ/kg	kJ/m³ 0 °C, 1,01325 bar
ugljik C potpuno izgaranje		406 900	33 910	–
nepotpuno izgaranje		124 000	10 330	–
sumpor S		296 600	9 260	–
vodik	H_s	286 700	142 200	12 800
	H_i	241 700	119 900	10 790
benzen C_6H_6 (benzol)	H_s	3 273 900	41 900	–
	H_i	3 138 900	40 200	–
naftalen $C_{10}H_8$ (naftalin)	H_s	5 160 500	40 300	–
	H_i	4 980 500	38 900	–
etanol C_2H_5OH (alkohol)	H_s	1 365 100	29 600	–
	H_i	1 230 100	26 700	–
ugljični monoksid CO		282 900	–	12 600
metan CH_4	H_s	889 100	–	39 700
	H_i	799 100	–	35 700
eten C_2H_4 (etilen)	H_s	1 449 200	–	64 700
	H_i	1 359 200	–	60 700
etin C_2H_2 (acetilen)	H_s	1 302 300	–	58 100
	H_i	1 257 300	–	56 100

Donja ogrjevna moć fizikalnih smjesa gorivih spojeva (plinovitih goriva) (u kJ/m³)

$$H_i = 12600\,CO' + 10800\,H_2' + 35700\,CH_4' + 60700\,C_2H_4' - 2000\,H_2O'$$

Donja ogrjevna moć složenih spojeva (npr. ugljena) može se točno odrediti samo pokusom. Za kruta i tekuća goriva služi približna formula (u kJ/kg)

$$H_i = 34000\,C' + 101700\,H' + 6300\,N' + 19100\,S' - 9800\,O' - 2500\,v'$$

Sastav dimnih plinova

Sastav je dimnih plinova pri potpunom izgaranju s obzirom na jedinicu volumena

$$CO_2'' + H_2O'' + N_2'' + O_2'' = 1 \text{ (m}^3\text{/m}^3 \text{ dimnih plinova)}$$

Udjeli pojedinih sastavina (kmol/kmol dimnih plinova) iznose:

– kod čvrstih i tekućih goriva

$$CO_2'' = C'/12 : D$$
$$H_2O'' = (H'/2 + v'/18) : D$$
$$N_2'' = (N'/28 + 79/21 \cdot \lambda\, O_{min}) : D$$
$$O_2'' = (\lambda - 1)\, O_{min} : D$$

– kod plinovitih goriva

$$CO_2'' = (CO' + CO_2' + CH_4' + 2C_2H_4') : D$$
$$H_2O'' = (H_2' + 2CH_4' + 2C_2H_4') : D$$
$$N_2'' = (N_2' + 79/21 \cdot \lambda\, O_{min}) : D$$
$$O_2'' = (\lambda - 1)\, O_{min} : D$$

Pri nepotpunom izgaranju sadrže dimni plinovi još: CO, CH_4 itd. Njihov sastav određujemo kemijskom analizom (npr. Orsatovim aparatom).

Entalpija dimnih plinova

Molna se entalpija dimnih plinova h_{mD} (kJ/kmol) pri raznim temperaturama može proračunati uz poznavanje sastava dimnih plinova i molne entalpije njihovih sastavina pri tim temperaturama (vidi str. 164):

$$h_{mD} = CO_2'' \cdot h_{m\,CO_2} + H_2O'' \cdot h_{m\,H_2O} + N_2'' \cdot h_{m\,N_2} + O_2'' \cdot h_{m\,O_2}$$

*

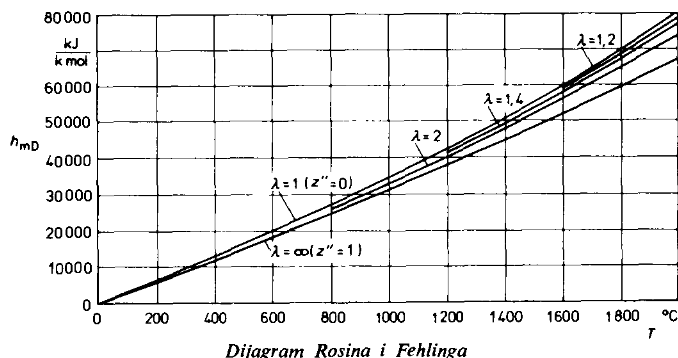
Molnu entalpiju dimnih plinova za tehnička goriva možemo odrediti također pomoću Rosinova i Fehlingova h_{mD}, T-dijagrama (vidi str. 205), koji uzima u obzir i disocijaciju iznad 1500 °C. Iz tog dijagrama možemo za svaku izabranu temperaturu odrediti molnu entalpiju $h_{m\,D1}$ za $\lambda = 1$ i molnu entalpiju $h_{m\,D\infty}$ pri $\lambda = \infty$ (čisti zrak).

Iz minimalne potrebne količine zraka Z_{min}, količine dimnih plinova D i poznatog faktora pretička zraka λ izračunavamo relativni udio zraka u dimnim plinovima Z''

$$Z'' = (\lambda - 1)\, Z_{min} : D$$

Otuda proizlazi molna entalpija dimnih plinova (kJ/kmol)

$$h_{m\,D} = h_{m\,D1} - Z''\,(h_{m\,D1} - h_{m\,D\infty})$$



Dijagram Rosina i Fehlinga

Teoretska temperatura izgaranja

Molnu entalpiju dimnih plinova $h_{m\,D}$ određujemo iz donje ogrjevne moći goriva H_i, specifične entalpije goriva h_g i molne entalpije zraka $h_{m\,Z}$ prije izgaranja te količine zraka Z i dimnih plinova D

$$h_{m\,D} = (H_i + h_g + Z\,h_{m\,Z})/D$$

Veličine H_i, h_g, Z i D odnose se kod čvrstih i tekućih goriva na jedinicu mase 1 kg goriva, a kod plinovitih goriva na jedinicu tvari 1 kmol goriva.

Iz dobivene molne entalpije $h_{m\,D}$ dimnih plinova određuje se za odgovarajući faktor pretička zraka λ teoretska temperatura izgaranja T pomoću Rosin-Fehlingova $h_{m\,D}$, T-dijagrama. Stvarna temperatura izgaranja je niža zbog odvođenja topline.

Kontrola izgaranja

1. Ni pepeo, ni dimni plinovi ne smiju sadržavati gorivih ostataka (neizgorjelog goriva, čađe, CO, CH_4 itd.).

2. Pretičak zraka λ (> 1) mora biti što manji, ali ipak tolik da se osigura potpuno izgaranje. Pretičak zraka kontroliramo sadržajem CO_2'' u dimnim plinovima. Što je veći faktor pretička zraka λ, to je manji udio CO_2''. Za čvrsta i tekuća goriva s karakteristikom σ pri potpunom izgaranju vrijedi

$$(CO_2'')_s = 1/[1 + \sigma(\lambda/0{,}21 - 1)]$$

gdje je $(CO_2'')_s$ sadržaj CO_2 u suhim dimnim plinovima (bez H_2O).

Goriva

Prirodna goriva jesu: kruta — drvo, treset i ugljen; tekuća — nafta (zemno ulje) i plinovita — zemni plin.

Umjetna goriva dobivaju se preradom iz prirodnih goriva ili drugih tvari.

Generatorski plin dobiva se iz krutih goriva (drveta, ugljena ili koksa) *rasplinjavanjem*, tj. nepotpunim izgaranjem u plinskim generatorima. (Dovođenjem zraka dobiva se »zračni plin«, a dodavanjem vodene pare »vodeni plin«. Smjesu obaju plinova nazivamo »miješanim plinom«.)

Retortni plin (rasvjetni i koksni plin) dobiva se iz prirodnih krutih goriva (ugljena, drveta) *suhom destilacijom*, tj. zagrijavanjem (pri 900...1100 °C) u retortama bez pristupa zraka.

Pri suhoj destilaciji dobiva se još i tekući proizvod — katran.

Koks i drveni ugljen su kruti ostaci pri suhoj destilaciji ugljena odn. drveta. Kao gorivo su praktički čisti ugljik, a sadrže još i sav pepeo goriva, iz kojega su proizvedeni.

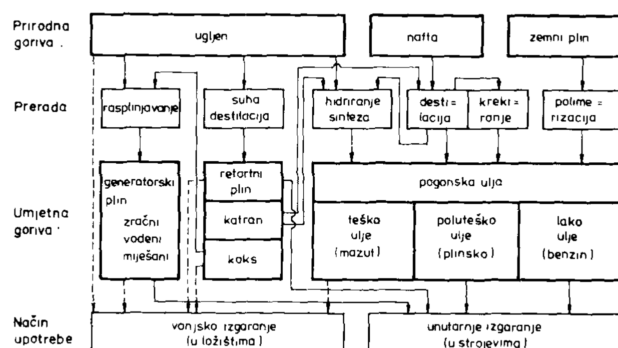
Pogonska ulja: laka (benzin, benzen), poluteška (plinsko ulje) i teška (loživo ulje, mazut) dobivaju se *frakcioniranom destilacijom* nafte i katrana. Udio lakih goriva povećava se *krekiranjem* (cijepanjem velikih molekula).

Laka pogonska ulja dobivaju se još i *hidriranjem* (spajanjem s vodikom) i *sintezom* (rasplinjavanjem i združivanjem molekula H_2, CO itd.) iz ugljena, katrana ili ostataka nafte, odnosno *polimerizacijom* (spajanjem malih molekula u veće) iz zemnog plina (sintetski benzin).

Etanol C_2H_5OH (etilalkohol, žesta, špirit) dobiva se alkoholnim vrenjem iz škroba.

Etin C_2H_2 (acetilen) razvija se djelovanjem vode na kalcijev karbid CaC_2.

Pregled glavnih metoda prerade prirodnih goriva u umjetna i načina njihove upotrebe



Pregled goriva

Kruta goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 kg) čista tvar* C	H	S	O	N	pepeo	vlaga	Donja ogrjevna moć H_i kJ/kg
drvo, prosuš.	50	6	0	43,9	0,1	< 0,5	10...20	14 700...16 700
smeđi ugljen	70	7	2,0	20	1,0	2...10	12...60	8 400...20 100
kameni ugljen	85	5	1,0	8	1,0	3...12	0...10	27 200...34 100
koks	97	0,5	0,8	0,7	1,0	8...10	1...7	27 800...30 300

* Prosječne vrijednosti.

Tekuća goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 kg) C	H	Gustoća kg/m³	Vrelište °C	Donja ogr. moć H_i kJ/kg
benzin	85	15	720	< 120	42 700
plinsko ulje	86	11	875	< 350	41 900
loživo ulje	87	11	940	> 350	41 200
naftalen $C_{10}H_8$* (naftalin)	93,7	6,3	977	218	38 850
benzen C_6H_6 (benzol)	92,2	7,8	884	80,5	40 270
etanol C_2H_5OH (alkohol)	52	13	794	78,3	26 750

* Talište 80 °C.

Plinovita goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 m³) H_2	CO	CH_4	C_2H_4	CO_2	N_2	Gustoća kg/m³	Donja ogr. moć H_i kJ/m³ 0 °C, 1,013 25 bar
vodik	H_2						0,089 87	10 790
uglj. monoksid	CO						1,250	12 620
metan	CH_4						0,7168	36 080
etan	C_2H_6						1,356	63 500
propan	C_3H_8						2,019	92 970
butan	C_4H_{10}						2,668	121 800
eten (etilen)	C_2H_4						1,260	60 570
etin (acetilen)	C_2H_2						1,171	56 340
koksni plin	50	8	29	4	2	7	0,53	19 300
rasvjetni plin	51	8	32	4	2	3	0,50	20 500
vodeni plin	49	42	0,5	—	5	3	0,71	10 800
miješani plin	12	28	3	0,2	3	54	1,12	6 000
zračni plin	6	23	3	0,2	5	62	1,19	4 800
grotleni plin	4	28	—	—	8	60	1,25	4 000

Rudnik	Vrsta	Veličina zrna mm	Sastav u % vlaga	pepeo	goriva tvar	Količina sumpora %	Donja ogrjevna moć H_l kJ/kg
Velenje	komad	>120	43	8	49	0,6	11 300
	kocka	65...120	43	8	49	0,6	11 300
	orah	35...65	43	9	48	0,6	11 100
	grah	10...35	43	9	48	0,6	11 100
	sitni	0...1	43	12	45	0,6	10 300
	prah	65	43	5	52	0,6	12 000
Trbovlje	komad	>60	20	12	68	1,9	18 000
	kocka	40...60	22	14	64	2,0	17 000
	orah	18...40	22	15	63	2,0	16 700
	grah	10...18	22	16	62	2,1	16 700
	sitni	3...10	24	17	59	2,1	15 700
	prah	0...3	34	19	47	1,8	12 500
Zagorje	komad	>60	21	9	70	1,0	18 600
	kocka	35...60	22	10	68	1,0	18 000
	orah	16...35	22	12	66	1,0	17 500
	grah	10...16	24	13	63	1,0	16 700
	sitni	3...10	24	17	59	2,1	15 700
	prah	0...3	32	18	50	0,9	13 300
Laško	komad	>60	19	7	74	0,3	19 800
	kocka	30...60	20	8	72	0,3	19 300
	orah	15...30	21	9	70	0,3	18 800
	grah	10...15	22	11	67	0,3	18 500
	sitni	5...10	26	13	61	0,3	16 400
	ksilit	0...5	36	25	39	0,3	10 500
Senovo	komad	>60	19	13	68	2,3	18 000
	kocka	33...60	19	15	66	2,2	17 500
	orah	17...33	19	17	64	2,1	17 000
	grah	10...17	19	18	63	2,0	16 700
	sitni	3...10	20	21	59	2,4	15 700
	prah	0...3	20	21	59	2,4	15 700

Rudnik	Vrsta	Sastav u % vlaga	pepeo	goriva tvar	Količina sumpora %	Donja ogrjevna moć H_l kJ/kg
Raša	— komad	2	12	86	9	28 100
	— kocka	2	13	85	8	27 800
	— orah	2	11	87	8	28 400
	— grah	3	10	87	8	28 400
	— sitni	3	15	82	8	26 800
Banovići	— komad	17	16	67	1,1	18 700
	— kocka	17	20	63	1,3	17 600
	— orah	18	21	61	0,6	16 600
	— sitni	20	22	58	0,4	16 200
Kakanj	— komad	8	21	71	1,3	21 100
	— kocka	8	22	70	1,4	20 800
	— orah	9	23	68	1,5	20 200
	— sitni	9	27	64	1,2	19 000
	— prah	9	28	63	0,5	18 700
Zenica	— komad	14	16	70	2,4	19 000
	— kocka	14	17	69	2,3	18 800
	— orah	15	18	67	2,8	18 200
	— sitni	16	20	64	2,2	17 400
	— prah	18	25	57	2,1	15 500
Kreka	— komad	33	9	58	0,5	14 100
	— kocka	32	15	53	0,4	15 100
	— orah	30	20	50	0,2	12 100
	— sitni	30	25	45	0,2	10 900
Senjsko-Resavski	— komad	20	16	64	0,8	17 400
	— sitni	19	23	58	0,9	15 800
Kolubara	— komad	48	10	42	0,4	9 600
	— sitni	49	12	39	0,4	9 300
Kostolac	— komad	43	14,5	42,5	0,7	9 700
	— sitni	36	34	30	0,6	6 800
Kosovo	— komad	45	10	45	0,7	9 800
	— sitni	41	21	38	0,6	8 200

PRIJENOS TOPLINE

Toplinska vodljivost

Toplinski tok Φ (tj. prolaz topline Q u vremenu t) kroz tvar je po iskustvenim zakonima upravo razmjeran temperaturnoj razlici $\Delta T = T_1 - T_2$ i površini A, a obrnuto razmjeran debljini ravne stijenke δ

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \frac{\lambda}{\delta}(T_1 - T_2)A$$

λ je k o e f i c i j e n t t o p l i n s k e v o d l j i v o s t i, a mjerimo ga jedinicom W/(m.K).

Toplinska se vodljivost mijenja s temperaturom, a kod plinova i para još i s tlakom. Brojčane vrijednosti λ za različite tvari sabrane su u tablicama na str. 212 do 217.

Prijelaz topline

Toplinski tok Φ koji prelazi s plinovite ili tekuće tvari na krutu stijenku, ili obratno, po iskustvu je upravno razmjeran temperaturnoj razlici $\Delta T = T_1 - T_2$ i površini A

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \alpha(T_1 - T_2)A$$

α je k o e f i c i j e n t p r i j e l a z a izražen jedinicom W/m^2 K.

Prijelaz topline na složen način ovisi o vrsti, temperaturi, tlaku i brzini plina, pare ili tekućine, koji toplinu predaju krutoj stijenki ili je od nje primaju. Nadalje, prijelaz topline ovisi o obliku i kvaliteti površine stijenke. Unatoč veoma opsežnom istraživačkom radu, toplinski je prijelaz općenito još i danas sasvim iskustvena vrijednost koja se može izračunati samo u nekim posebno jednostavnim slučajevima. *Nusseltova teorija sličnosti* omogućila je određivanje prijelaza topline pomoću bezdimenzijskih značajki (brojeva):

Reynoldsova značajka	$Re = v\,d/\nu$
Prandtlova značajka	$Pr = \varrho\,c\,\nu/\lambda$
Pécletova značajka	$Pe = v\,d\,\varrho c/\lambda = Re \cdot Pr$
Grasshofova značajka	$Gr = d^3 g(T_1 - T_2)\beta/\nu^2$
Nusseltova značajka	$Nu = \alpha\,d/\lambda$

gdje su: d – promjer (m), v – brzina (m/s), g – ubrzanje sile teže (= 9,81 m/s^2), $(T_1 - T_2)$ – temperaturna razlika (K), β – volumenski koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}), ϱ – gustoća (kg/m^3), c – specifični toplinski kapacitet (u plinova je $c = c_p$) [J/(kg · K)], λ – koeficijent toplinske vodljivosti [W/(m · K)], α – koeficijent prijelaza topline (W/m^{2}K), ν – kinematička viskoznost (m^2/s).

Ako cijev nije okrugla, treba za d uvrstiti odgovarajući hidraulički promjer $d' = 4\,A/O$ (A = površina, O = opseg). Za pravokutni je presjek cijevi $d' = 2\,ab/(a + b)$.

Vrijednosti za β navedene su na str. 159, a vrijednosti za ϱ, c, λ i ν tekućina i plinova na str. 212 do 214.

*

Najjednostavniji primjeri proračuna prijelaza topline pomoću Nusseltove značajke $Nu = \alpha\,d/\lambda$:

a) S l o b o d n o s t r u j a n j e p l i n o v a i t e k u ć i n a

Prijelaz topline s vodoravne cijevi promjera d na miran zrak ili viskoznu tekućinu vodljivosti λ:

– na zrak	$\alpha\,d/\lambda = 0{,}37 \cdot Gr^{0{,}25}$
– na tekućinu	$\alpha\,d/\lambda = 0{,}40 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0{,}25}$

b) P r i s i l n o s t r u j a n j e p l i n o v a

Strujanje duž ravne ploče duljine l

pri $v > 5$ m/s vrijedi $\alpha\,l/\lambda = 0{,}075 \cdot Pe^{0{,}75}$

Strujanje okomito na os cijevi:

– za osamljenu cijev	$\alpha\,d/\lambda = 0{,}092 \cdot Pe^{0{,}75}$
– za snop cijevi	$\alpha\,d/\lambda = \zeta \cdot 0{,}075 \cdot Pe^{0{,}75}$

gdje za cijevi u poretku šahovskog polja, koje su jedna iza druge, vrijedi:

broj redova cijevi	2	4	6	8	10
vrijednost za ζ	1,00	1,23	1,36	1,43	1,47

Brzinu v treba uzeti na najužem mjestu između dviju cijevi!

Strujanje kroz ravnu cijev $\alpha\,d/\lambda = 0{,}040 \cdot Pe^{0{,}75}$

c) P r i s i l n o s t r u j a n j e t e k u ć i n a

Laminarno strujanje (koje se javlja u tekućina u uskim cijevima ako je $Re < 2300$) kroz duge ravne cijevi

$$\alpha\,d/\lambda \approx 3{,}65$$

Turbulentno strujanje

$$\alpha\,d/\lambda = 0{,}0396\,Pr \cdot Re^{0{,}75}/[1 + 0{,}35\,(Pr - 1)]$$

*

Koeficijent prijelaza topline α iznosi:

za plinove	14 ... 40 W/m^{2}K
za tekućine	2000 ... 4000 W/m^{2}K

Pri promjeni agregatnog stanja ima prijelaz topline općenito mnogo veće vrijednosti. Za vodu iznosi:

pri vrenju		3000 ... 16000 W/m^{2}K
pri kondenzaciji	– filmskoj	6000 ... 12000 W/m^{2}K
	– kapljičastoj	30000 ... 46000 W/m^{2}K

Toplinska svojstva tvari

Toplinska svojstva plinova i para (pri tlaku 0,980 665 bar ≈ 1 bar)

Plin (para)	Temperatura t °C	Gustoća ϱ kg/m³	Spec. topl. kapacitet c_p kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)	Kinemat. viskoznost ν mm²/s
zrak	− 50	1,534	1,004	0,020 5	9,65
	− 20	1,365	1,004	0,022 6	12,0
	0	1,252	1,009	0,023 7	13,9
	20	1,164	1,013	0,025 1	15,7
	40	1,092	1,013	0,026 5	17,6
	60	1,025	1,017	0,027 9	19,4
	80	0,968	1,021	0,029 3	21,5
	100	0,916	1,021	0,030 7	23,6
	120	0,870	1,026	0,032 0	25,9
	160	0,789	1,030	0,034 4	30,6
	200	0,723	1,034	0,037 0	35,5
	250	0,653	1,042	0,040 0	42,2
	300	0,596	1,047	0,042 9	49,2
	400	0,508	1,059	0,048 5	64,6
	600	0,391	1,088	0,058 1	98,8
	800	0,318	1,113	0,066 9	137
	1 000	0,268	1,139	0,076 1	181
	1 200	0,232	1,164	0,084 5	227
	1 400	0,204	1,189	0,093 0	278
	1 600	0,182	1,218	0,101 2	332
vodik H_2	− 50	0,106 4	—	0,147	69,1
	0	0,086 9	14,232	0,176	97,1
	50	0,073 4	14,358	0,202	128
	100	0,063 6	14,442	0,229	162
	200	0,050 2	14,525	0,276	240
ugljični dioksid CO_2	− 50	2,373	—	0,010 9	4,76
	0	1,912	0,828	0,014 3	7,23
	50	1,616	0,875	0,017 8	10,0
	100	1,400	0,925	0,021 3	13,2
sumporni dioksid SO_2	0	2,83	0,624	0,008 4	4,09
	50	—	0,649	—	—
	100	—	0,674	—	—
	200	—	0,720	—	—
amonijak NH_3	0	0,746	2,168	0,022 0	12,5
	50	0,626	2,198	—	17,7
	100	0,540	2,231	0,030 0	24,2
	200	0,425	2,394	—	39,0

Toplinska svojstva vodene pare

Tlak p bar	Temperatura t °C	Gustoća ϱ kg/m³	Spec. topl. kapacitet c_p kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)	Kinemat. viskoznost ν mm²/s
1	100	0,598	2,032	0,023 7	21,4
	120	0,557	1,999	0,025 1	23,9
	140	0,529	1,981	0,026 5	26,5
	160	0,504	1,973	0,028 0	29,4
	180	0,481	1,964	0,029 4	32,2
	200	0,460	1,964	0,030 9	35,3
2	140	1,070	2,050	0,027 7	13,4
	160	1,016	2,024	0,029 0	14,8
	180	0,968	2,007	0,030 2	16,2
	200	0,926	1,999	0,031 6	17,8
	220	0,887	1,998	0,033 0	19,3
	240	0,851	1,998	0,034 5	21,3
4	160	2,067	2,149	0,030 9	7,43
	180	1,963	2,106	0,031 8	8,13
	200	1,872	2,075	0,033 1	8,93
	220	1,789	2,058	0,034 3	9,70
	240	1,715	2,045	0,035 6	10,7
	260	1,647	2,041	0,037 0	11,5
	280	1,585	2,041	0,038 4	12,5
6	160	3,160	2,315	0,033 0	4,98
	180	2,989	2,226	0,033 7	5,48
	200	2,841	2,162	0,034 5	6,02
	220	2,710	2,123	0,035 6	6,58
	240	2,593	2,101	0,036 7	7,15
	260	2,487	2,088	0,038 0	7,72
	280	2,391	2,078	0,039 4	8,38
8	180	4,047	2,364	0,036 2	4,14
	200	3,834	2,265	0,036 8	4,58
	220	3,650	2,199	0,037 5	5,01
	240	3,486	2,161	0,038 5	5,44
	260	3,339	2,135	0,039 6	5,89
	280	3,206	2,118	0,040 8	6,35
	300	3,085	2,110	0,042 2	6,84
	320	2,974	2,105	0,043 7	7,33
10	180	5,144	2,569	0,040 9	3,43
	200	4,857	2,371	0,040 2	3,78
	220	4,610	2,268	0,040 3	4,13
	240	4,394	2,216	0,041 0	4,48
	260	4,203	2,186	0,042 0	4,88
	280	4,032	2,164	0,043 1	5,26
	300	3,876	2,156	0,044 6	5,65
	320	3,734	2,147	0,046 0	6,03

Tekućina	Temperatura t °C	Gustoća ϱ kg/m³	Spec. topl. kapacitet c_p kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)	Kinemat. viskoznost ν mm²/s
voda	0	1 000	4,219	0,555	1,79
	20	998	4,182	0,598	1,01
	40	992	4,178	0,627	0,658
	60	983	4,190	0,651	0,478
	80	972	4,199	0,669	0,364
	100	958	4,215	0,681	0,295
	120	944	4,232	0,685	0,249
	140	926	4,257	0,684	0,217
	160	908	4,282	0,680	0,189
	180	887	4,395	0,673	0,172
	200	863	4,500	0,665	0,162
	250	794	4,855	0,644	0,137
	300	700	5,693	0,564	0,131
mazivo ulje	20	871	1,850	0,144	15,0
	40	858	1,934	0,143	7,93
	60	845	2,018	0,142	4,94
	80	832	2,101	0,141	3,40
	100	820	2,185	0,140	2,44
	120	807	2,269	0,138	1,91
transformatorsko ulje	20	866	1,892	0,124	36,5
	40	852	1,993	0,123	16,7
	60	842	2,093	0,122	8,69
	80	830	2,198	0,120	5,20
	100	818	2,294	0,119	3,79
ugljični dioksid CO_2	20	771	3,642	0,087	0,062 4
	30	596	—	0,071	0,054 3
sumporni dioksid SO_2	—20	1 485	—	0,223	0,321
	0	1 435	1,356	0,212	0,256
	20	1 383	1,390	0,199	0,220
amonijak NH_3	—20	665	4,562	0,585	0,383
	0	639	4,646	0,540	0,376
	20	610	4,772	0,494	0,360
monoklormetan CH_3Cl	—20	997	1,507	0,195	0,310
	0	960	1,570	0,179	0,304
	20	921	1,591	0,163	0,293
živa Hg	0	13 595	0,140	10,5	0,125
	20	13 546	0,139	9,3	0,115

Kovina	Temperatura t °C	Gustoća ϱ kg/m³	Spec. topl. kapacitet c kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)
aluminij	20	2 700	0,896	229
bakar, čisti	20	8 930	0,383	395
trgovački	20	8 300	0,419	372
bronca, alumin.	20	7 800	0,419	—
kositrena	20	8 750	0,352	55
cink	20	7 130	0,385	113
crveni lijev	20	8 600	0,377	60
čelik, 0,1% C	0	7 850	0,465	59
	400	—	0,628	44
	600	—	—	37
— 0,2% C	20	7 850	0,460	50
— 0,6% C	20	7 840	0,460	47
— 13% Cr	20	7 750	0,460	29
— Cr-Ni	20	7 900	0,477	14
	500	—	0,607	21
— 18 Cr 8 Ni	20	7 880	0,502	20
— 36% Ni	20	8 130	0,502	16
duralumin	20	2 700	0,912	165
	100	—	—	181
elektron	20	1 800	—	116
kositar (kalaj)	20	7 280	0,226	65
magnezij, čisti	20	1 740	1,017	143
mjed (mesing)	20	≈ 8 600	0,381	≈ 93
monel	20	8 580	0,500	26
nikal, čisti	20	8 800	0,446	58
novo srebro	20	—	0,393	24
olovo, čisto	0	11 340	0,128	35
	100	—	0,134	34
platina	20	21 400	0,133	70
silumin	20	2 600	0,900	159
sivi lijev	20	≈ 7 250	0,540	≈ 58
srebro	20	10 500	0,234	417
volfram	20	19 300	0,134	—
zlato	20	19 250	0,129	310
željezo, čisto	20	7 850	0,465	67

Toplinska svojstva anorganskih krutina

Materijal	Temperatura t °C	Gustoća ϱ kg/m³	Spec. topl. kapacitet c kJ/kg K	Koef. topl. vodljivosti λ W/(m · K)
azbestne ploče	20	2000	–	0,7
azbestna vuna	20	300	–	0,09
	20	600	–	0,20
beton, suhi	20	≈ 2100	0,880	≈ 1,10
granit	20	2900	0,750	2,9
kotlovac				
– karbonatni	300	1000 . . . 2500	–	0,15 . . . 2,30
– silikatni	300	300 . . . 1200	–	0,08 . . . 0,23
– sulfatni	300	2000 . . . 2700	0,840	0,7 . . . 2,30
kremen	50	≈ 400	0,840	≈ 0,08
kremeno staklo	20	2210	0,710	1,36
led (H_2O)	0	917	1,930	2,2
	−50	924	–	2,8
mramor	20	≈ 2600	0,800	2,8
opeka, suha	20	≈ 1700	0,840	≈ 0,46
pijesak, suhi	20	1520	–	0,33
pješčenjak	20	≈ 2220	0,710	≈ 1,9
porculan	20	≈ 2360	0,800	≈ 1,2
silikatna opeka	100	≈ 1850	–	≈ 1,10
(silika)	1000	–	–	≈ 1,60
snijeg	0	200	–	0,15
staklena vuna	20	50	0,670	0,036
	20	300	–	0,043
staklo	20	2700	0,840	0,76
šamotna opeka	100	≈ 1850	0,840	≈ 0,8
	1000	–	1,130	≈ 1,0
tlo, ilovačasto	20	1450	0,880	1,28
vapnenac	20	2650	0,840	2,2
vuna od troske	20	200	0,750	0,04
	20	500	–	0,06
zid od opeke	20	–	–	≈ 0,75
žbuka, zidna	20	1690	0,840	0,80

Toplinska svojstva organskih krutina

Materijal	Temperatura t °C	Gustoća ϱ kg/m³	Spec. topl. kapacitet c kJ/kg K	Koef. toplinske vodljivosti λ W/(m · K)
asfalt	20	2120	0,920	0,74
bakelit	20	1270	1,590	0,23
pamuk				
– češljani	20	81	–	0,059
– pleteni	–	245	1,300	0,077
– tkani	–	330	–	0,070
celuloid	20	1400	–	0,215
ebonit	20	1190	1,420	0,16
guma	20	1200	1,420	≈ 0,16
gumena spužva	20	224	–	0,055
koks	20	1400	0,920	–
drvo (prosušeno)				
– bor $\perp$	20	≈ 550	2,790	0,14
=	–	–	–	0,28
– bukva =	20	≈ 700	–	0,35
– hrast $\perp$	20	≈ 850	2,390	≈ 0,10
=	–	–	–	0,37
drveni ugljen	20	200	0,840	0,06
papir	20	1000	1,340	0,14
pluto	20	200	1,380	0,05
ugljen	20	≈ 1200	1,300	≈ 0,21
ugljena prašina	30	730	1,300	0,12
šećer	0	1600	1,260	0,6
svila, tkana	0	147	–	0,045
	50	–	1,260	0,055
	100	–	–	0,060
koža	20	1000	1,510	≈ 0,16
vuna				
– češljana	20	9	–	0,036
– pletena	–	176	1,670	0,04
– tkana	–	380	–	0,050
piljevina (sitna)	20	190	–	0,06

Toplinsko zračenje (isijavanje)

Zračenje topline jest odavanje energije elektromagnetskim valovima duljine 0,8 . . . 300 μm (toplinske — infracrvene zrake).

Apsorpcijski koeficijent a jest omjer energije W_a koju tijelo apsorbira (upija) i sve energije W koja dospijeva na površinu tijela

$$a = W_a/W < 1$$

$W_a = W$ $\quad a = 1$ — toplinski »crno« tijelo
$W_a = 0$ $\quad a = 0$ — toplinski »bijelo« tijelo

Stvarna tijela nisu ni toplinski »bijela« ni »crna«, već toplinski »siva«:

$$0 < W_a < W \qquad 0 < a < 1$$

Emisijski koeficijent ε jest omjer energije W_s koju odaje površina »sivog« tijela i energije $W_č$ koju odaje površina »apsolutno crnog« tijela:

$$\varepsilon = W_s/W_č < 1$$

Po Kirchhoffovu zakonu vrijedi (pri jednakoj temperaturi): $\varepsilon = a$.
Emisijski koeficijenti tehnički važnih tvari sabrani su na str. 219.

Stefan-Boltzmannov zakon

Toplinski tok Φ koji pri zračenju odašilje apsolutno crno tijelo upravno je razmjeran površini A i 4. potenciji apsolutne temperature T

$$\Phi = \sigma_0 T^4 A$$

gdje je $\quad \sigma_0 = 5{,}669\,61 \cdot 10^{-8} \quad \mathrm{W/m^2\,K^4}$

U tehnici se ta jednadžba upotrebljava u obliku

$$\Phi = \sigma (T/100)^4 A$$

gdje je σ »konstanta zračenja apsolutno crnog tijela«

$$\sigma = 5{,}67 \quad \mathrm{W/m^2\,K^4}$$

Za »siva« tijela vrijedi $\quad \Phi_s = \varepsilon\sigma(T/100)^4 A$

gdje je ε emisijski koeficijent sivog tijela.

Izmjena topline zračenjem između dvaju tijela apsolutnih temperatura T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) i emisijskih koeficijenata ε_1 i ε_2

$$\Phi = \sigma'[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]A$$

gdje je σ':

a) u veoma velikih, blizu smještenih, paralelnih i ravnih ploha ($A = A_1 = A_2$) $\quad \sigma' = \sigma/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$

b) ako drugo tijelo (2) potpuno okružuje prvo tijelo (1)

$$\sigma' = \sigma/[1/\varepsilon_1 + \omega(1/\varepsilon_2 - 1)]$$

Ako je ploha A_1 znatno manja od plohe A_2 ($\omega \approx 0$), vrijedi: $\quad \sigma' = \varepsilon_1\sigma$.

c) za proizvoljno smještene plohe A_1 i A_2 je $\quad \sigma' = \varepsilon_1\varepsilon_2\sigma$.

Emisijski koeficijent ε površinskog zračenja

Površina		Temperatura t	Emisijski koeficijent
materijal	stanje	°C	ε
kovine:			
aluminij	oksidiran	25	0,07
	poliran	230	0,05
alum. za bronzir.	namaz	100	0,30
bakar	tamno oksidiran	20	0,78
	oksidiran	130	0,76
	poliran	20	0,030
cink	oksidiran	20	0,25
	poliran	230	0,045
čelik	tamno zarđao	20	0,85
	lijevana površina	100	0,80
	valjana površina	20	0,77
	crveno zarđao	20	0,61
	brušen	20	0,24
	sjajan, jetkan	150	0,128
kositar	sjajan	20	0,07
krom	poliran	150	0,058
mjed	oksidirana	338	0,22
	polirana	300	0,05
nikal	poliran	100	0,045
olovo	oksidirano	20	0,28
	polirano	130	0,06
sivi lijev	tokaren	20	0,43
srebro	polirano	20	0,025
zlato	polirano	20	0,025
nekovine:			
drvo	blanjano	20	0,90
krovna ljepenka		20	0,93
lak, emajl		20	0,90
lak za radijatore		100	0,925
led	gladak	0	0,966
mramor	poliran	20	0,93
opeka	gruba, crvena	20	0,93
papir		95	0,85
porculan		20	0,93
staklo		90	0,94
svilena tkanina		20	0,77
šamot		1200	0,60

Prolaz topline

a) *Prolaz topline kroz stijenke pri dovođenju toplinskog toka dodirom*

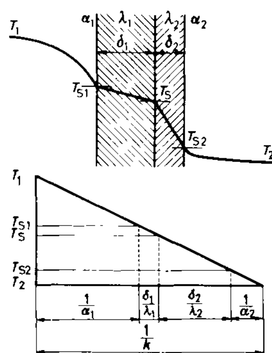
Toplinski tok koji prelazi s neke tvari (temperature T_1 i koeficijenta prijelaza α_1) na stijenku, kroz tu stijenku (debljine δ i koeficijenta toplinske vodljivosti λ) te sa stijenke na drugu tvar (temperature T_2 i koeficijenta prijelaza α_2) iznosi za površinu stijenke A

$$\Phi = Q/t = k(T_1 - T_2)A$$

k je koeficijent prolaza topline koji se dobiva iz jednadžbe

$$1/k = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2$$

Koeficijent prolaza topline k mjerimo istim jedinicama kao i koeficijent prijelaza topline α, tj. u W/m^2K.



Za višeslojne stijenke (npr. za stijenke od dva sloja, od kojih jedan ima debljinu δ_1 i vodljivost λ_1, a drugi debljinu δ_2 i vodljivost λ_2) koeficijent prolaza topline k računamo po jednadžbi

$$1/k = 1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_2$$

Temperature na pojedinim mjestima stijenke možemo odrediti trokutnim dijagramom (lijevo) ili jednadžbama

$$T_{s1} = T_1 - k(1/\alpha_1)(T_1 - T_2)$$

$$T_s = T_1 - k(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1)(T_1 - T_2)$$

$$T_{s2} = T_1 - k(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2) \cdot (T_1 - T_2)$$

b) *Prolaz topline kroz stijenku pri dovođenju toplinskog toka zračenjem i dodirom*

Toplinski tok koji prelazi *dodirom* s neke tvari (temperature T_1 i koeficijenta prijelaza α_1) i istodobno *zračenjem* s neke stijenke (temperature T i emisijskog koeficijenta ε) na drugu stijenku (emisijskog koeficijenta ε_s), te prolazi kroz tu stijenku (debljine δ i vodljivosti λ) i s nje prelazi na drugu tvar (temperature T_2 i koeficijenta prijelaza α_2) iznosi

$$\Phi = k(T_1 - T_2)A$$

Koeficijent k računamo iz jednadžbe

$$1/k = 1/(\alpha + \alpha_1) + \delta/\lambda + 1/\alpha_2$$

gdje je $\alpha = \sigma'[(T/100)^4 - (T_{s1}/100)^4]/(T_1 - T_{s1})$

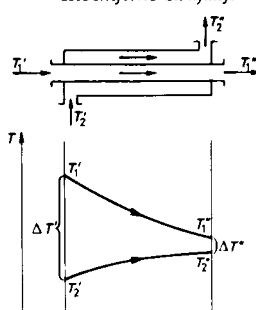
Vrijednost σ' izračunavamo iz poznatih koeficijenata ε i ε_s (vidi str. 219), a temperaturu T_{s1} iz jednadžbe $T_{s1} = T_1 - k/\alpha + \alpha_1 (T_1 - T_2)$.

Tehnički izmenjivači topline

Toplinski tok Φ prelazi s tvari početne temperature T_1' i konačne niže temperature T_1'' na tvar početne temperature T_2' i konačne više temperature T_2''. Temperaturna razlika između obiju tvari na svakom je mjestu izmjenjivača drukčija.

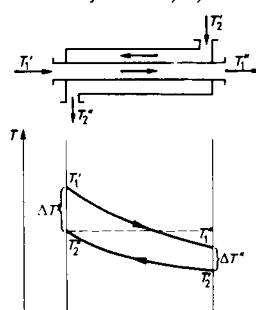
S obzirom na međusobni smjer strujanja obiju tvari u izmjenjivaču, razlikujemo istosmjerno, protusmjerno i unakrsno strujanje.

Istosmjerno strujanje



$\Delta T' = T_1' - T_2'$
$\Delta T'' = T_1'' - T_2''$

Protusmjerno strujanje



$\Delta T' = T_1' - T_2''$
$\Delta T'' = T_1'' - T_2''$

Toplinski tok u izmjenjivaču topline računamo pomoću prosječne temperaturne razlike ΔT_{med} $\quad \Phi = k \cdot \Delta T_{med} \cdot A$

gdje su: k – koeficijent prolaza topline (vidi str. 220), A – površina izmjenjivača.

Prosječna (»logaritamska«) temperaturna razlika iznosi

$$\Delta T_{med} = (\Delta T' - \Delta T'')/\ln(\Delta T'/\Delta T'')$$

Prosječna (logaritamska) temperaturna razlika ΔT_{med} pri protusmjernom strujanju veća je nego pri istosmjernom.

Pri protusmjernom strujanju može biti konačna temperatura tvari koji toplinu prima (grijući se) viša od konačne temperature tvari koji toplinu predaje (hladeći se). Pri istosmjernom je strujanju, međutim, konačna temperatura tvari koji toplinu prima uvijek niža od konačne temperature tvari koji toplinu predaje.

Zato u izmjenjivačima topline protusmjerno strujanje ima uvijek prednost pred istosmernim. Unakrsno se strujanje po svom efektu približuje protusmjernome.

TOPLINSKI UREĐAJI I STROJEVI

Simboli

čista, sirova, nečista – voda	kemijska priprema vode	turbina
para, zrak, dimni plinovi	parni kotao	stapni pogonski stroj
gorivi plin, ulje, ugljen	parni kotao s pregrijačem	elektromotor
ventil, redukcioni ventil	isparivač (transformator pare)	gonjeni stroj (općenito)
odvodnik kondenzata	plinski generator	turbopumpa
otvoreni rezervoar, tlačni rezervoar	gorionik (za ulje)	stapna pumpa
izmjenjivač topline miješanjem	potrošač topline	turbokompresor ventilator
površinski izmjenjivač topline	ispuh	stapni kompresor
površinski izmjenjivač topline	kondenzator na miješanje	transportni stroj
odvajač pare	površinski kondenzator	električni generator
odvajač prašine (ciklon)	površinski kondenzator (s povratnim hlađenjem)	mjerač
ejektor	rashladni toranj	regulator

PARNI KOTLOVI

Parni su kotlovi toplinski uređaji koji se sastoje od:

a) *uređaja za loženje,* tj. ložišta (prostora za izgaranje), u kojem se izgaranjem oslobađa kemijski vezana energija goriva da bi prešla na dimne plinove, i pomoćnih uređaja za loženje (roštilj, gorionik itd.),

b) *izmjenjivača topline* (parnog kotla u užem smislu), u kojem toplina prelazi s dimnih plinova na vodu odnosno paru.

Toplinski tok Φ koji s gorivom dolazi u ložište izražavamo potroškom goriva B (kg/s) i njegovom donjom ogrjevnom moći H_i

$$\Phi = B H_i$$

Dovodimo li u ložište zagrijan zrak za izgaranje, dolazi s njime još i toplinski tok

$$\Phi_Z = B Z h_{mZ}$$

gdje su: Z – količina zraka za izgaranje na jedinicu količine goriva (kmol/kg) (str. 202), h_{mZ} – molna entalpija zraka (kJ/kmol) (str. 164).

Ložišta su građena za:

- izgaranje u sloju, tj. roštilju (ravnom ručnom ili mehaničkom, stepeničastom i sl. za komadno gorivo),
- izgaranje u lebdenju, tj. u komori za izgaranje (za ugljenu prašinu, ulje ili plin).

Površinu roštilja R (m^2) određujemo na temelju »površinskog toplinskog opterećenja ložišta«

$$\Phi/R = B H_i/R$$

koje iznosi za: ravni ručni roštilj 600 ... 1000 kW/m^2
mehanički roštilj 900 ... 1600 kW/m^2
stepenasti roštilj 700 ... 800 kW/m^2

Volumen ložišnog prostora V (m^3) ocjenjujemo na temelju »prostornog toplinskog opterećenja ložišta«

$$(\Phi + \Phi_Z)/V = B(H_i + Z h_{mZ})/V$$

koji iznosi: za mehanički roštilj 250 ... 400 kW/m^3
pri loženju
– ugljenom prašinom 170 ... 330 kW/m^3
– uljem 900 ... 2500 kW/m^3
– plinom 1600 ... 2500 kW/m^3

Pri izgaranju pod tlakom (ulja ili plina) dostiže specifično opterećenje ložišta i do 8000 kW/m^3.

Presjek ložišta S_k (m^2) ocjenjujemo na osnovu »površinskog toplinskog opterećenja presjeka ložišta«

$$(\Phi + \Phi_Z)/S_k = B(H_i + Z h_{mZ})/S_k$$

koji iznosi za ložišta na ugljenu prašinu 2300 ... 2800 kW/m^2.

Izmjenjivač topline s dimnih plinova na vodu odnosno paru izveden je kao sistem cijevi.

Vodu odn. paru zagrijavamo pri konstantnom tlaku p koji održavamo regulacijom loženja, pri čemu napojne pumpe napajaju kotao protokom vode q (kg/s).

S obzirom na različite uvjete prijenosa topline na vodu odn. paru, razlikujemo slijedeće dijelove izmjenjivača topline:

a) *Zagrijač vode* (ekonomajzer) u kojem se napojna voda temperature T_v i specifične entalpije h_v zagrijava do temperature T_a, pri čemu joj naraste specifična entalpija na h_a. Da se voda ne bi isparavala već u zagrijaču, mora temperatura T_a biti niža od temperature zasićenja T_s (koja odgovara tlaku p u parnom kotlu), $T_a < T_s$. Zato je također $h_a < h'$. (Specifična entalpija h' određena je tlakom p.)

U zagrijaču vode dovodimo vodi toplinski tok Φ_a

$$\Phi_a = q(h_a - h_v)$$

b) *Isparivač* je namijenjen daljnjem zagrijavanju vode do temperature zasićenja T_s i njenom isparivanju. U isparivaču dobivamo mokru paru suhoće $x = 0{,}95 \ldots 0{,}96$ i entalpije $h_b = h' + x(h'' - h')$. (Specifične entalpije h' i h'' određene su tlakom p.)

U isparivaču dovodimo vodi-pari toplinski tok Φ_b

$$\Phi_b = q(h_b - h_a)$$

c) *Pregrijač pare* služi za sušenje pare do potpune suhoće $x = 1$ (suho zasićena para) i njenom pregrijavanju do temperature pregrijanja T, pri čemu se pari poveća specifična entalpija na vrijednost h (koja je određena tlakom pare p i temperaturom T).

V pregrijaču dovodimo pari toplinski tok Φ_c

$$\Phi_c = q(h - h_b)$$

Suprotno načelu protustrujnog izmjenjivača topline dimni plinovi predaju toplinu najprije isparivaču (budući da voda koja se isparava dovoljno hladi cijevne stijenke pa ih možemo smjestiti u područje najviših temperatura), zatim pregrijaču (u kojemu pregrijana para — plin slabo hladi cijevne stijenke pa ih stoga ne možemo smjestiti u područje najviših temperatura) i konačno zagrijaču vode. U parnih kotlova koji upotrebljavaju zagrijan zrak za izgaranje (ložišta na ugljenu prašinu, ulje ili plin) smješten je na kraju puta dimnih plinova *zagrijač zraka* (koji vraća toplinski tok Φ_Z u ložište).

Zbog odvođenja toplinskih tokova iz dimnih plinova na isparivač i pregrijač pare te na zagrijač vode i zraka, dimni se plinovi postupno ohlađuju. Konačna temperatura dimnih plinova, osobito ako sadrže mnogo vlage, ne smije biti manja od 140 °C (jer bi se kondenzacijom vlage na hladnim cijevnim stijenkama stvarale kiseline koje bi ih najedale).

Proračun veličine ogrjevnih površina pojedinih dijelova izmjenjivača topline – vidi str. 221.

Kapacitet (snaga) parnog kotla određen je toplinskim tokom koji u svim dijelovima izmjenjivača topline dovodimo vodi-pari

$$\Phi_k = \Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = q(h - h_v)$$

Osim toplinskog toka Φ_k upotrebljava se za oznaku kapaciteta parnih kotlova također:

a) proizvodnja pare q (što nije točno jer uz istu proizvodnju pare q toplinski tok Φ_k ovisi još i o razlici entalpija $h - h_v$);

b) ogrjevna površina izmjenjivača A (što je netočno jer toplinski tok Φ_k uz inače jednake ogrjevne površine ovisi i o koeficijentu prolaza topline k i o prosječnoj temperaturnoj razlici ΔT, vidi str. 221).

Korisnost parnoga kotla

Toplinski tok Φ_k, koji prelazi na vodu-paru bit će manji od toplinskog toka Φ koji dolazi u ložište s gorivom ($\Phi_k < \Phi$), i to zbog gubitaka u parnom kotlu (ložištu i izmnjenjivaču topline), tj. zbog

neizgorjelih ostataka goriva u pepelu	do 5%,
letećeg koksa i čađe	do 8%,
neizgorjelih plinova – CO, CH_4 itd.	do 1%,
topline dimnih plinova	8 . . . 11%,
zračenja i prijenosa topline na okolinu	do 12%.

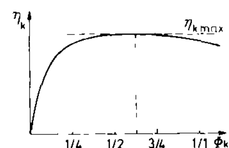
Korisnost parnog kotla η_k je omjer toplinskih tokova Φ_k i Φ

$$\eta_k = \Phi_k / \Phi = q(h - h_v)/BH_i$$

a iznosi za razne kotlove:

za manje (s ravnim roštiljem)	$\eta_k = 0{,}72 \ldots 0{,}78$
za veće (s mehaničkim roštiljem)	$\eta_k = 0{,}77 \ldots 0{,}84$
za najveće (pri loženju ugljenom prašinom, uljem ili plinom)	$\eta_k = 0{,}83 \ldots 0{,}91$

Krivulja ovisnosti korisnosti o oprerećenju teče u širokom pojasu opterećenja vrlo položito. (Ovdje nisu uračunati dodatni gubici zbog pogonskih prekida djelovanja kotla.)



Najveću korisnost $\eta_{k\,max}$ postiže pri najčešćem opterećenju, tj. pri 2/3 . . . 3/4 nazivnog kapaciteta kotla.

Energija pare s obzirom na temperaturu okoline T_0 proistječe – osim iz toplinskog toka Φ_k – još i iz toplinskog toka Φ_0 što ga je napojna voda primila prije ulaza u parni kotao iz drugih izvora koji su joj povećali specifičnu entalpiju od h_0 pri temperaturi T_0 na h_v pri temperaturi T_v

$$\Phi_0 = q(h_v - h_0)$$

Ukupna energija pare na izlazu iz kotla izražena je dakle toplinskim tokom

$$\Phi_0 + \Phi_k = q(h - h_0)$$

Napojne pumpe

Svaki parni kotao mora imati najmanje dva uređaja za napajanje koji dobivaju pogonsku energiju iz međusobno nezavisnih izvora (npr. elektromotor i parni stroj, benzinski ili dizelski motor i sl.).

Za napajanje služe ponajviše stapne pumpe i turbopumpe.

Kapacitet napojnih pumpi odabire se tako da bi pri kvaru na najvećoj pumpi sve preostale dobavljale protok q_p koji je veći od najvećeg protoka q vode-pare kroz parni kotao, i to:

$q_p = 1,6q$ – ako je parni kotao bez automatske regulacije, a protok je $q \leqq 30$ t/h,

$q_p = 1,25q$ – ako parni kotao ima automatsku regulaciju, a protok je $q > 30$ t/h ili je pogon neposredno s glavnog parnog stroja.

Potrebna snaga za pogon napojnih pumpi iznosi:

– teoretska $P_0 = q_p\left[\frac{(p - p_n) + \Delta p}{\varrho} + g h_g\right]$

– efektivna $P = \frac{P_0}{\eta_p}$

gdje znači: p – tlak u kotlu, p_n – tlak u napojnom spremniku, Δp – protočne gubitke, ϱ – gustoću vode pri temperaturi napajanja T_v, h_g – geodetsku visinu razine vode u kotlu nad razinom u napojnom rezervoaru, $g = 9,81$ m/s^2, η_p – korisnost pumpe.

Pretočne gubitke Δp ocjenjujemo s:

0,5 ... 1 bar – za zagrijač vode (ekonomajzer),
2,5 bar – za napojni regulator,
2 ... 3 bar – za otpore u cjevovodima

Koristnost napojnih pumpi η_p iznosi:

$\eta_p = 0,9 \ldots 0,97$ – kod stapnih pumpi s neposrednim djelovanjem pogonskog stroja na stapajicu pumpe,

$\eta_p = 0,8 \ldots 0,9$ – kod normalnih stapnih pumpi,

$\eta_p = 0,6 \ldots 0,9$ – kod turbopumpi.

*

Za visokotlačne parne kotlove, kod kojih moramo uzeti u obzir povećanje gustoće vode pri napajanju, računamo teoretsku snagu pumpe pomoću entalpijske razlike vode

$$P_0 = q_p(h_v - h_r)$$

gdje znače: h_r – specifičnu entalpiju vode pri atmosferskom tlaku p_a i temperaturi ispred napojne pumpe, h_v – specifičnu entalpiju vode nakon izentropske kompresije u pumpi.

RADNA SPOSOBNOST PARE

Energija pare je upotrebljiva u cijelosti samo kao toplina koju možemo prenositi s jednog tijela na drugo (grijanje). Međutim, čitava energija pare nije na raspolaganju za pretvorbu u mehanički rad.

Eksergija pare je radna sposobnost pare (sposobnost za pretvorbu njezine unutarnje energije u mehanički rad) s obzirom na temperaturu okoline T_0.

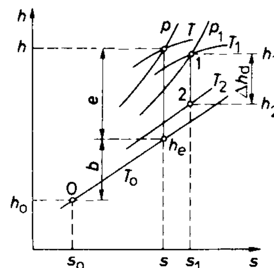
Specifična eksergija pare na izlazu iz parnog kotla iznosi

$$e = (h - h_0) - b \qquad b = T_0(s - s_0)$$

gdje su: b — specifična anergija pare; h, s — specifična entalpija odn. specifična entropija pregrijane pare; h_0, s_0 — specifična entalpija odn. specifična entropija vode pri stanju okoline.

Specifična eksergija pare e pokazuje koji bi se dio energije pare mogao teoretski pretvoriti u mehanički rad s obzirom na temperaturu okoline T_0.

Raspoloživi pad entalpije Δh_d



Eksergija pare međutim nije u cijelosti raspoloživa za pretvorbu u mehanički rad iz slijedećih razloga:

1. U cjevovodu od parnog kotla do parnog stroja para se ohlađuje s temperature T na T_1 ($T - T_1 = 5 \ldots 10$ K) i prigušuje s tlaka p na p_1 (uz brzinu protjecanja 30 ... 50 m/s iznosi $p - p_1$: pri srednjim tlakovima 2 ... 3 bar, pri najvišim tlakovima 10 ... 15 bar). Temperatura T_1 i tlak p_1 određuju specifičnu entalpiju h_1 pare ispred parnog stroja; $h_1 < h$.

2. Na kraju izentropske ekspanzije pare ne postižemo temperaturu okoline T_0, nego temperaturu T_2 koja je viša $T_2 > T_0$, i to:

a) kod kondenzacionih je naprava temperaturna razlika $T_2 - T_0$ malena ($t_2 \approx 28 \ldots 42$ °C) i služi samo za prijenos topline s pare na rashladnu vodu (temperaturi T_2 odgovara u kondenzatoru tlak p_2 od 0,04 ... 0,08 bar),

b) kod ispušnih je strojeva temperatura T_2 znatno viša ($t_2 = 102 \ldots 104$ °C) i odgovara konačnom tlaku p_2 koji je viši od atmosferskoga za otpore trenja u ispušnim vodovima ($p_2 = 1,1 \ldots 1,2$ bar),

c) kod protutlačnih je strojeva temperatura T_2 još viša ($t_2 = 120 \ldots 180$ °C) te joj odgovaraju i viši konačni tlakovi ($p_2 = 2 \ldots 10$ bar).

Konačna je specifična entalpija pare h_2 stoga viša.

Raspoloživi pad entalpije Δh_d dan je razlikom specifične entalpije h_1, koja je određena početnim stanjem (p_1, T_1), i konačne specifične entalpije h_2, koja je određena izentropom i temperaturom T_2 (tlakom p_2):

$$\Delta h_d = h_1 - h_2 < e$$

PARNI STROJEVI

Parni strojevi su pogonski strojevi koji upotrebljavaju vodenu paru kao neposredno pogonsko sredstvo; to su stapni strojevi i parne turbine. (Iznimno su parni strojevi građeni i za pogon drugim parama, npr. živinim.)

Snaga parnih strojeva proizlazi iz protoka pare q i raspoloživog entalpijskog pada Δh_d (vidi str. 227).

Teoretska snaga P_0 iznosi

$$P_0 = q\,\Delta h_d = q\,(h_1 - h_2)$$

Stvarni entalpijski pad Δh manji je od raspoloživoga zbog unutarnjih gubitaka u stroju (prigušivanje pare, toplinska razmjena između pare i stijenki stroja, nepotpuna ekspanzija itd.)

$$\Delta h = h_1 - h_{2'} < \Delta h_d$$

gdje je $h_{2'}$ stvarna specifična entalpija pare na izlazu iz stroja.

Unutarnja korisnost stroja

$$\eta_i = \Delta h / \Delta h_d$$

pokazuje koji dio raspoloživoga entalpijskog pada parni stroj stvarno iskorištava i time označuje stupanj valjanosti stroja.

Unutarnja snaga stroja P_i iznosi

$$P_i = q\,\Delta h = \eta_i q\,\Delta h_d = \eta_i P_0$$

Efektivna snaga stroja P (na pogonskoj osovini) manja je zbog vanjskih gubitaka stroja (mehaničkih gubitaka zbog trenja u ležajima i zglobovima stroja, pogona regulatora itd.) i iznosi

$$P = \eta_m P_i = \eta\, P_0 = \eta\, q\,\Delta h_d$$

gdje su: η_m – mehanička korisnost stroja η – cjelokupna korisnost stroja

$$\eta = \eta_i \eta_m$$

*

Valjanost se stroja još gdjekada u praksi izražava – umjesto pravilno korisnošću – »jediničnim potroškom pare«, i to s obzirom na unutarnju snagu

$$q/P_i = 1/(\eta_i \cdot \Delta h_d)$$

ili s obzirom na efektivnu snagu

$$q/P = 1/(\eta \cdot \Delta h_d)$$

što međutim ne pokazuje stvarne valjanosti stroja. Jedinični potrošak pare nije naime ovisan samo o korisnosti η_i odnosno η, već i o raspoloživom entalpijskom padu Δh_d, a on ne ovisi o stroju.

Stapni parni strojevi

Stapni parni strojevi bili su prvi i stoga posebno značajni pogonski toplinski strojevi. Danas su stabilne parne strojeve potisnule parne turbine, dok su brodske i lokomotivske parne strojeve zamijenili naročito dizelovi motori, a na željeznici još i električna vuča. Iznimka su neke novije izvedbe brzih »parnih motora«.

Indicirana snaga P_{ind} stroja iznosi

$$P_{ind} = (d^2 - d_b^2)\,\frac{\pi}{4}\,p_{med}\,s\,2\,i\,n$$

gdje znače: d — promjer parnog cilindra, d_b — promjer stapajice (u radnom prostoru cilindra), p_{med} — prosječni indicirani tlak u cilindru, s — stapaj, i — broj cilindara (dvoradnih), n — brzinu vrtnje.

Zanemarimo li gubitak topline cilindra na okolinu i gubitke pare zbog propustnosti stapa i razvodnika, indicirana snaga P_{ind} približno je jednaka unutarnjoj snazi P_i

$$P_{ind} \approx P_i$$

Prosječni indicirani tlak u cilindru p_{med} određujemo iz indikatorskog dijagrama koji dobivamo indiciranjem. On ovisi u prvom redu o ulaznom tlaku pare p_1, punjenju ε (dijelu stapaja za vrijeme kojega ulazi para u cilindar) i brzini vrtnje n.

Prosječni tlak u cilindru izražavamo kao dio ulaznog tlaka

$$p_{med} = \alpha p_1 \qquad \alpha < 1$$

Koeficijent α ovisi o punjenju ε i brzini vrtnje n te raste s većim punjenjem ($\varepsilon = 0{,}1 \ldots 0{,}8$) i manjom brzinom vrtnje n, a iznosi:

$$\alpha \approx 0{,}25 \ldots 0{,}75$$

Trošenje stapnih prstenova smanjujemo ograničavanjem »prosječne stapne brzine $v_{med} = 2\,s\,n$.

Brzina vrtnje n ograničena je inercijom masa mehanizama u translatornom gibanju, tj. stapa, stapajice, križne glave i dijela ojnice (oko 2/5).

Korisnosti

Indicirana korisnost $\eta_{ind} = P_{ind}/P_0$ ovisi u prvom redu o punjenju ε i brzini n, a približno je jednaka unutarnjoj korisnosti: $\eta_{ind} \approx \eta_i$.

Mehanička korisnost η_m također ovisi o brzini vrtnje n. Najbolje vrijednosti ukupne korisnosti $\eta = \eta_i \eta_m$ ispušnih stapnih strojeva na pregrijanu paru iznose

$$\eta = 0{,}55 \ldots 0{,}75$$

Manje se vrijednosti odnose na male, a veće na velike strojeve.

Parne turbine

Parne su turbine brzi rotacijski strojevi koji rade povoljno pri konstantnoj brzini vrtnje. Stoga su idealni strojevi za pogon električnih generatora.

U usporedbi sa stapnim parnim strojevima parne turbine imaju stanovite prednosti, u prvom redu jednoličniji pogon i veću mogućnost izvedbe od najmanjih do najvećih jedinica (0,5 ... 200000 kW i više). Izpušna je para u njih praktički bez ulja. Kod manjih izvedbi, npr. kao pomoćni strojevi, parne turbine imaju doduše manju korisnost nego stapni strojevi, ali zu zato jednostavnije i lakše te i u tom slučaju dolaze u obzir. Parne turbine nisu prikladne za rad pri veoma promjenljivim brzinama vrtnje. Osim toga turbina se može okretati samo u jednom smislu.

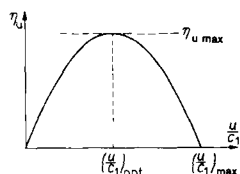
U parnim se turbinama toplinska energija pare (raspoloživi entalpijski pad Δh_d) pretvara u kinetičku energiju parnog mlaza koji se – djelovanjem na pokretne lopatice rotora – pretvara u mehanički rad.

Apsolutne brzine mlaza – c_1 na ulazu u rotorske lopatice i c_2 na izlazu iz njih – ovisne su od raspoloživog entalpijskog pada u staroru samom (stalnotlačno djelovanje – akcijsko) ili u statoru i rotoru (pretlačno djelovanje – reakcijsko).

Snaga turbine na obodu lopatičnog kola P_u je

$$P_u = q\,u(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2)$$

gdje znače: q – protok parne mase, u – obodnu brzinu kola (lopatica), α_1 – kut između apsolutne ulazne brzine i obodne brzine, α_2 – kut između apsolutne izlazne brzine i obodne brzine.



Obodna brzina u određena je promjerom lopatičnog kola d i brzinom vrtnje n

$$u = d\pi n$$

Korisnost na obodu lopatičnoga kola η_u jest omjer snage na obodu P_u i teoretske snage P_0 (vidi str. 228); ona ovisi o omjeru obodne brzine i apsolutne ulazne brzine u/c_1

$$\eta_u = P_u/P_0 = f(u/c_1)$$

Najveću korisnost $\eta_{u\,max}$ dobivamo pri optimalnom omjeru $(u/c_1)_{opt}$ koji iznosi:

kod akcijskih stupnjeva	0,4 ... 0,5
kod reakcijskih stupnjeva	0,6 ... 0,7

Turbina radi dakle s dobrom korisnošću samo u uskom području obodnih brzina u odnosno brzina vrtnje n. Pri naglom rasterećenju mogla bi da pobjegne do brzine koja odgovara omjeru $(u/c_1)_{max} \approx 2(u/c_1)_{opt}$ (što regulator mora spriječiti).

S obzirom na čvrstoću turbinskog rotora brzine vrtnje n ograničene su maksimalnim obodnim brzinama u koje iznose 120 ... 400 m/s, no veće se vrijednosti mogu postići samo najboljim izvedbama (oblik kola, materijal!).

Obodnu brzinu smanjujemo stupnjevanjem brzine u više rotorskih vijenaca lopatica (Curtisovo kolo) ili izvedbom s više akcijskih ili reakcijskih stupnjeva. Izvedene turbine većinom su kombinacije osnovnih tipova.

Unutarnja snaga turbine P_i iznosi

$$P_i = q\,\Delta h$$

gdje je Δh – stvarni entalpijski pad (vidi str. 228).

Unutarnja snaga P_i manja je od obodne P_u za unutarnje gubitke trenja i ventilacije: $P_i < P_u$. Budući da su ti gubici neznatni, uzimamo da je unutarnja snaga P_i približno jednaka obodnoj snazi P_u: $P_i \approx P_u$.

Unutarnja korisnost η_i iznosi

$$\eta_i = P_i/P_0 \approx \eta_u$$

Najveće vrijednosti unutarnje korisnosti η_i, mehaničke korisnosti η_m i cjelokupne korisnosti $\eta = \eta_i \eta_m$ parnih turbina iznose:

Vrsta turbine	η_i	η_m	η
velike, mnogo stupnjeva	0,80 ... 0,86	0,985	0,79 ... 0,85
srednje	0,72 ... 0,78	0,98	0,70 ... 0,76
male, nekoliko stupnjeva	0,60 ... 0,70	0,97	0,58 ... 0,68
osobito male	–	–	< 0,50

Najuobičajenije vrijednosti tlaka p i temperature T pare ispred turbine:

snaga	mala	srednja	velika
p (bar)	15 ... 30	40 ... 70	100 ... 200
T (°C)	320 ... 450	450 ... 500	500 ... 600

Vrste turbina:

Kondenzacijske parne turbine iskorištavaju sav entalpijski pad (od tlaka svježe pare do kondenzacijskog tlaka). Imaju velik broj stupnjeva (visokotlačnih, srednjetlačnih i niskotlačnih) koji mogu biti raspoređeni u nekoliko kućišta pa i na više osovina. Upotrebljavaju se u parnim termoelektranama.

Pri regenerativnom zagrijavanju napojne vode (str. 236) upotrebljavaju se kondenzacijske parne turbine s odvojcima za paru.

Industrijske parne turbine su turbine prilagođene posebnim potrebama, npr.:

– protutlačne turbine koje iskorištavaju samo gornji dio entalpijskog pada, imaju manji broj stupnjeva (visokotlačnih i srednjetlačnih) pa su razmjerno manje. (Upotrebljavaju se također za toplane.);

– turbine na otpadnu paru (iz drugih izvora) imaju samo niskotlačne stupnjeve.

KONDENZACIJA

Iz parnog stroja otječe protok q većinom već mokre pare ($x > 0,9$) tlaka p_2 i odgovarajuće temperature T_2 te specifične entalpije $h_{2'}$. U kondenzatoru predaje para pri konstantnom tlaku p_2 toplinski tok Φ, zbog čega se potpuno pretvara u kapljevinu (kondenzira) i obično još nešto pothladi do temperature kondenzata T_k ($< T_2$) i entalpije h_k. ($T_2 - T_k = 0 \dots 5$ K).

Zanemarimo li neznatan neposredni prijelaz topline s kondenzatora na okolinu, prelazi toplinski tok Φ na rashladnu vodu, koja se pri protoku q_v ugrijava od temperature T_{v1} na T_{v2}. Ako je c specifični toplinski kapacitet vode, onda je

$$\Phi = q(h_{2'} - h_k) = q_v c(T_{v2} - T_{v1})$$

U površinskih kondenzatora toplina mora prolaziti kroz stijenke, zbog čega rashladna voda mora uvijek biti hladnija od pare: $T_{v2} < T_k$; u kondenzatora na miješanje para i rashladna voda su u neposrednom dodiru pa se konačne temperature izjednačuju: $T_{v2} = T_k$.

Ulazna temperatura rashladne vode T_{v1} iznosi:

	t_{v1}
a) pri dovođenju vode neposredno iz okoline	
– iz rijeke, jezera ili mora	0...25 °C
– iz bunara	5...15 °C
b) pri dovođenju vode iz rashladnog tornja	20...35 °C

Da bismo postigli što veći podtlak u kondenzatoru, dopuštamo samo neznatno zagrijavanje rashladne vode u kondenzatoru:

$$\Delta T = T_{v2} - T_{v1} = 5 \dots 10\text{K}$$

Zbog toga je potrebna vrlo velika količina rashladne vode, a njezin protok q_v zavisi od protoka pare q i iznosi

u površinskih kondenzatora $q_v = (50 \dots 60)q$
u kondenzatora na miješanje $q_v = (25 \dots 30)q$

Ovisno o temperaturi rashladne vode postižemo u kondenzatoru tlak

s vodom iz okoline 0,04...0,05 bar
s vodom iz rashladnog tornja 0,07...0,08 bar

U površinskom kondenzatoru, iako je rashladna voda obične prirodne čistoće, dobivamo potpuno čist kondenzat (destilacija!) koji je vrlo prikladan za napajanje parnih kotlova. U kondenzatoru na miješanje kondenzat se miješa s rashladnom vodom pa čistoća takve mješavine zavisi od čistoće rashladne vode. Upotrebljavamo li tu mješavinu za napajanje parnih kotlova, mora rashladna voda biti u odgovarajućoj mjeri očišćena (kemijski omekšana).

Zrak u pari (koji se u kondenzatoru ne kondenzira) isisavamo iz kondenzatora posebnim zračnim pumpama ili ejektorima (vodenim ili parnim mlazom).

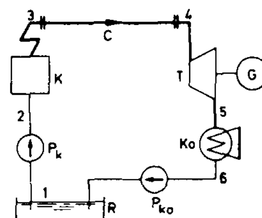
Proračun prolazne površine kondenzatora vidi na str. 221. Pri brzini rashladne vode u cijevima $v = 1,5 \dots 2,5$ m/s iznosi koeficijent prolaza topline $k = 2900 \dots 4100$ W/m^2 K. (Prosječno možemo za protok pare $q = 1$ kg/s računati s površinom od $75 \dots 100$ m^2.)

PARNA POSTROJENJA

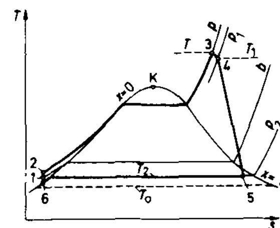
Kondenzacijska parna postrojenja namijenjena su isključivo za proizvodnju mehaničke energije, većinom za pogon električnih generatora u parnim termoelektranama.

Jednostavno kondenzacijsko parno postrojenje s kružnim protokom vode-pare q prikazano je u slijedećoj shemi:

R — spremnik napojne vode
P_k — napojna pumpa
K — parni kotao
C — parni cjevovod
T — parni stroj (turbina)
G — električni generator
Ko — kondenzator
P_{ko} — kondenzatna pumpa



Voda-para na kružnom putu mijenja svoje toplinsko stanje. Karakteristična mjesta različitih toplinskih stanja označena su u shemi brojevima od 1 do 6, a tako i u Ts-dijagramu:



Stanje na mjestu	Temperatura	Tlak	Specifična entalpija
1	T_r	p_a	h_r
2	T_v	p	h_v
3	T	p	h
4	T_1	p_1	h_1
5	T_2	p_2	$h_{2'}$
6	T_k	p_2	h_k

Promjene specifične entalpije vode-pare zbog promjene stanja:

1—2	u napojnoj pumpi	za $+ (h_v - h_r)$
2—3	u parnom kotlu	za $+ (h - h_v)$
3—4	u parnom vodu	za $- (h - h_1)$
4—5	u parnom stroju (turbini)	za $- (h_1 - h_{2'})$
5—6	u kondenzatoru	za $- (h_{2'} - h_k)$
6—1	u kondenzatnoj pumpi	za $+ (h_r - h_k)$

Za jednostavno kondenzacijsko parno postrojenje možemo obično uzeti da je

$$T_k \approx T_r \approx T_v \quad \text{i} \quad h_k \approx h_r \approx h_v$$

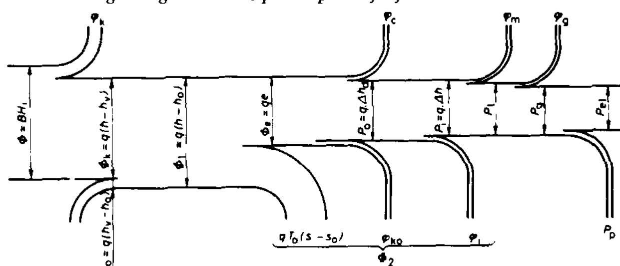
pa su u tom slučaju točke 6, 1 i 2 u Ts-dijagramu gotovo identične.

Kod kratkih parnih vodova između parnog kotla i parnog stroja (turbine) također je

$$T \approx T_1 \quad \text{i} \quad p \approx p_1 \quad \text{i zato} \quad h \approx h_1$$

pa su točke 3 i 4 također gotovo identične.

Shema energetskog toka kroz parno postrojenje u termoelektrani



S ugljenom dovodimo u parni kotao toplinski tok Φ. Zbog gubitaka u kotlu φ_k na napojnu vodu prelazi samo toplinski tok Φ_k. Tome se pridružuje toplinski tok Φ_0 što ga dovodimo s toplom napojnom vodom, jer je njezina temperatura T_v obično viša od temepratūre okoline T_0 ($T_v > T_0$), i to stoga što je temperatura kondenzata koji pritječe u spremnik napojne vode viša od temperature okoline (pogotovu pri hlađenju kondenzatora vodom iz rashladnog tornja). Osim toga često se iskorištava još i otpadna toplina ispušne pare iz pomoćnih parnih strojeva itd. za zagrijavanje napojne vode.

Para donosi iz parnog kotla toplinski tok

$$\Phi_1 = \Phi_k + \Phi_0 = q(h - h_0)$$

Od toga toplinskog toka za pretvorbu u rad sposoban je samo eksergijski tok

$$\Phi_e = qe = q(h - h_e) = \Phi_1 - qT_0(s - s_0)$$

Za pretvorbu u rad ostaje neiskorišten još i eksergijski gubitak zbog gubitaka u parnom vodu

$$\varphi_c = q(h - h_1)$$

i gubitak zbog kondenzacije pare pri temperaturi T_2, koja je viša od temperature okoline T_0 ($T_2 > T_0$)

$$\varphi_{k0} = q(h_2 - h_e)$$

Preostalom raspoloživom padu entalpije $\Delta h_d = h_1 - h_2$ odgovarajući toplinski tok određuje teoretsku snagu stroja

$$\Phi_d = \Phi_e - (\varphi_c + \varphi_{k0}) = q\Delta h_d = P_0$$

Unutarnji gubici u stroju

$$\varphi_i = q(h_{2'} - h_2)$$

smanjuju toplinski tok na Φ_i i određuje unutarnju snagu stroja P_i

$$\Phi_i = \Phi_d - \varphi_i = \Phi_e - (\varphi_c + \varphi_{k0} + \varphi_i) = q\Delta h = P_i$$

Zbog dodatnih mehaničkih gubitaka u parnom stroju φ_m smanjuje se unutarnja snaga parnog stroja P_i na efektivnu (stvarnu) snagu na osovini stroja (turbine) P_t, a zbog gubitaka u električnom generatoru φ_g snaga generatora P_g još je manja ($P_g < P_t$).

Vlastiti potrošak električne energije u centrali P_p služi za pogon elektromotora za dizalice i transportne naprave (transport ugljena i pepela), za ventilatore, pumpe itd., dalje za rasvjetu i grijanje te napajanje različitih električnih uređaja u centrali. Za taj potrošak, koji iznosi prosječno približno 8...10% snage generatora P_g, smanjuje se snaga P_{el} što je centrala predaje mreži.

Korisnost

parnog kotla	$\eta_k = \Phi_k/\Phi = q(h - h_v)/BH_i$
termička	
— eksergije	$\eta_e = e/(h - h_0)$
— raspoloživog pada entalpije	$\eta_d = \Delta h_d/e$
— ukupna	$\eta_{th} = \eta_e \eta_d = \Delta h_d/(h - h_0)$
parnog stroja	
— unutarnja	$\eta_i = P_i/P_0 = \Delta h/\Delta h_d$
— mehanička	$\eta_m = P_t/P_i$
— ukupna (turbine)	$\eta_t = \eta_i \eta_m = P_t/q\,\Delta h_d$
električnoga generatora	$\eta_g = P_g/P_t$

Cjelokupna korisnost parne centrale

$$\eta_{tot} = \left(\eta_k + \frac{\Phi_0}{\Phi}\right)\eta_{th} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{P_{el}}{P_g} = \frac{P_{el}}{BH_i}$$

Kad je temperatura napojne vode T_v približno jednaka temperaturi okoline T_0, tako da njihovu razliku možemo zanemariti ($T_v \approx T_0$), onda vrijedi

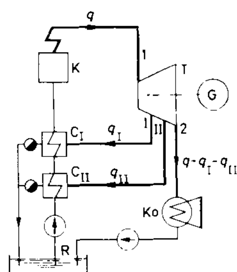
$$h_v \approx h_0 \quad \text{i} \quad \Phi_0 = 0$$

pa je

$$\eta_{tot} = \eta_k \cdot \eta_{th} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{P_{el}}{P_g} = \frac{P_{el}}{BH_i}$$

Najlošija je korisnost eksergije η_e. Da bi je popravili, težimo što većoj eksergiji pare, koju postižemo što višom temperaturom pare i odgovarajućim visokim tlakom. Temperature su vrlo ograničene (otpornošću stijenki pregrijača) i iznose 360...560 (...650) °C, dok su tlakovi gotovo neograničeni i iznose 12...160 (...300 i više) bara.

Regenerativno grijanje napojne vode



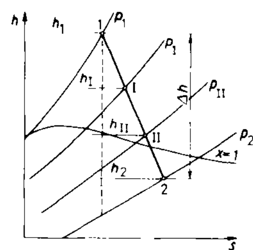
Iz parnog kotla dovodimo parni protok q u kondenzacijsku parnu turbinu s oduzimanjem, iz koje odvodimo kod prvog odvojka I (pri tlaku p_I) protok q_I, kod drugog odvojka II (pri tlaku p_{II}) protok q_{II} dok preostali protok $q - q_I - q_{II}$ prelazi nakon potpune ekspanzije u kondenzator. Oduzetim protocima zagrijavamo napojnu vodu u zagrijačima C_I in C_{II}.

U površinskim zagrijačima ogrjevna se para kondenzira, a kondenzat vodimo u spremnik napojne vode – vidi sliku; u zagrijačima s miješanjem ogrjevna se para miješa s napojnom vodom.

Unutarnja snaga turbine smanjila se zbog oduzimanja ogrjevne pare protoka q_I i q_{II} te iznosi

$$P_i = q\Delta h - [q_I(h_I - h_2) + q_{II}(h_{II} - h_2)]$$

gdje su specifične entalpije pare: h_I – na odvojku I, h_{II} – na odvojku II, h_2 – na izlazu iz turbine u kondenzator.



U zagrijačima C_I in C_{II} (te s kondenzatom što ga uvodimo u rezervoar napojne vode) prenosi ogrjevna para na napojnu vodu toplinski tok

$$\Phi_g = q_I(h_I - h_r) + q_{II}(h_{II} - h_r)$$

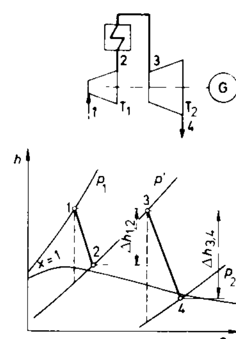
gdje je h_r – specifična entalpija napojne vode u spremniku R.

Toplinskom toku Φ_0, što ga s već zagrijanom napojnom vodom dovodimo u parni kotao (vidi shemu energijskog toga na str. 234), prudružuje se još toplinski tok Φ_g.

Budući da je $h_r \ll h_2$, bit će smanjenje unutarnje snage turbine znatno manje od povećanja topline koju regenerativno dovodimo napojnoj vodi. Zato se cjelokupna korisnost povećava i to prosječno za 6 do 12%.

Pri regenerativnom zagrijavanju napojne vode, voda se u jednom stupnju zagrijava za približno 40 K, za što se potroši oko 5 . . . 10% pare, koja prilazi turbini. (Pri peterostepenom regenerativnom zagrijavanju dolazi do kondenzatora samo još 75 . . . 50% pare koja prilazi turbini.) Za jednaku snagu turbine je stoga potreban osjetno veći dotok svježe pare (q) nego pri turbini bez regenerativnog zagrijavanja.

Međupregrijavanje



Pri velikoj ekspanziji s visokoga početnog tlaka i temperature do vrlo niskog tlaka u kondenzatoru prešla bi para pri kraju ekspanzije u veoma vlažno područje ($x < 0,9$), što bi u niskotlačnim stupnjevima parnih turbina izazvalo nedopuštenu e r o z i j u lopatica. Da to spriječimo, pregrijavamo paru u međupregrijaču (dimnim plinovima parnog kotla ili svježom vrućom parom), tako da u svakom slučaju ostane njena suhoća $x \geqq 0,9$.

Za međupregrijavanje treba nam dodatni toplinski tok

$$\Phi_{2,3} = q(h_3 - h_2)$$

pri čemu je q – protok pare pri ulazu u međupregrijač.

U obim turbina T_1 in T_2 dobivamo pri jednakom protoku pare q (tj. bez odcijepa) unutarnju snagu

$$P_i = q[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)]$$

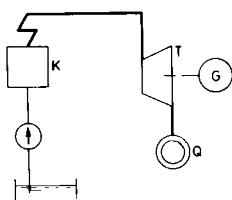
Međupregrijavanje pare je uvijek združeno i s regenerativnim zagrijavanjem napojne vode. U tom je slučaju prvi odvod pare u točki stanja 2, a slijedeći se odvodi smještaju na drugu turbinu (T_2).

Proizvodnja električne i toplinske energije (toplane)

U kondenzacijskom parnom postrojenju odvodimo s rashladnom vodom znatan toplinski tok

$$\Phi_2 = q(h_{2'} - h_0)$$

koji se sastoji od dijela toplinskog toka $qT_0(s - s_0)$ koji se ne da pretvoriti u rad, od eksergijskih gubitaka $q(e - \Delta h_d)$ i od unutarnjih gubitaka parnog stroja $q(\Delta h_d - \Delta h)$; vidi str. 234. Taj se toplinski tok Φ_2 odvodi pri temperaturi T_2, koja je u kondenzacijskom parnom postrojenju samo nešto viša od temperature okoline T_0, pa zato, općenito, nije upotrebljiva za grijanje (osim za grijanje kupališnih bazena itd., gdje je dovoljna i mala temperaturna razlika $T_2 - T_0$).



Povišenjem protutlaka p_2 povisujemo i temperaturu T_2 pare iza parnog stroja, zbog čega para postaje prikladnom za grijanje. Zato takvu paru vodimo iz parnog stroja — umjesto u kondenzator — k potrošačima topline Q.

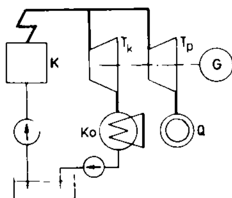
Ukoliko se sav čisti kondenzat ne vraća od potrošača topline u spremnik napojne vode, moramo manjak nadomjestiti očišćenom (umekšanom) vodom iz okoline.

Pri različitim protutlakovima p_2 postižemo slijedeće temperature T_2 koje su prikladne za grijanje zgrada ili industrijskih naprava (osobito u papirnoj, tekstilnoj, kemijskoj i srodnoj industriji itd.):

p_2 (bar)	1	2	4	6	8	10	12	16
T_2 (°C)	100	120	144	159	170	180	188	201

Povišenjem protutlaka p_2 smanjuje se doduše entalpijski pad Δh, a time i unutarnja snaga stroja $P_i = q\Delta h$, ali zato ostaje za grijanje upotrebljiv sav toplinski tok $\Phi_2 = q(h_{2'} - h_0)$. Stoga se znatno povećava ekonomičnost pri skupnoj proizvodnji mehaničkog rada za pogon generatora i topline za grijanje.

Zbog povišenja protutlaka p_2 postaje suvišan niskotlačni dio parnog stroja (turbine). Budući da se, osim toga, para iz stroja odvodi neposredno potrošačima topline, nije više potreban ni kondenzator sa svim uređajima za rashladnu vodu. Cjelokupno se postrojenje veoma pojednostavnjuje.



Tamo gdje se ne može vremenski potpuno uskladiti potrošak električne energije i topline za grijanje, prikladna je kombinacija dviju turbina – kondenzacijske T_k i protutlačne T_p. Protutlačna turbina daje toliko mehaničke energije koliko to odgovara potrošku topline, dok kondenzacijska turbina dobavlja ostatak potrebne mehaničke energije. Dovod svježe pare objema turbinama izveden je automatskim regulatorima tako da protutlačnom turbinom upravlja tlačni regulator, a kondenzacijskom regulator brzine vrtnje.

MOTORI S NUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s nutarnjim izgaranjem su klipni strojevi kojima dovodimo prikladna goriva (koja ne ostavljaju pepela, smolastih ostataka itd.) zajedno sa zrakom za izgaranje neposredno u unutrašnjost cilindra, gdje izgaraju i oslobađajući toplinu povisuju tlak koji djeluje na klip i obavlja mehanički rad.

Sistemi Otto i Diesel

– Sistem Otto. Smjesu goriva i zraka za izgaranje, pripremljenu izvan cilindra, uvodimo u cilindar u kojem je klip komprimira (do 7...11 bar). Pri svršetku kompresije smjesa se pali električnom iskrom, našto u cilindru poraste tlak (25...40 bar) koji pri slijedećem – radnom – stapaju služi za vršenje rada.

U motorima sistema Otto upotrebljavamo:

a) plinovita goriva (rasvjetni, koksni, generatorski, grotleni ili sličan plin), koja se miješaju sa zrakom u ventilu za miješanje prije usisavanja ili u posebno konstruiranom usisnom ventilu;

b) kapljevita goriva (benzin, benzen, alkohol itd.), koja se u rasplinjaču (karburatoru) raspršuju (ne rasplinjuju!) u zraku za izgaranje kao fina maglica, a zatim se gorivo tek u cilindru pretvara u paru (plin) zbog kompresije i dovođenja topline sa stijenki.

Izgaranje u sistemu Otto zbiva se približno po izohori (V_k – vidi na str. 240).

– Sistem Diesel. Čisti zrak za izgaranje uvodimo u unutrašnjost cilindra u kojem ga klip tako snažno komprimira (do 25 . . . 40 bar) da se pri kraju kompresije postiže temperatura paljenja goriva (550 . . . 700 °C), koje u tom trenutku ubrizgavamo u cilindar. Povećani tlak (60 . . . 100 bar), prouzročen izgaranjem, služi pri slijedećem – radnom – stapaju za vršenje rada.

U dizelskim motorima upotrebljavamo jeftinija, poluteška i teška ulja (plinska i dizelska ulja). Posebnom visokotlačnom pumpom (350...500 bar) štrcamo gorivo kroz fine sapnice za raspršivanje u cilindar, tako da nastane uljna maglica koja u vrućem komprimiranom zraku odmah plane. Izgaranje se zbiva najprije približno po izohori (V_k), a zatim po izobari (p_{max} – slika na str. 240).

Za motore s užarenom glavom (»semidizelske motore«) upotrebljavamo isto gorivo kao i za dizelske motore. Gorivo se za vrijeme kompresije zraka (koja nije tako velika kao u dizelskih motora) ubrizgava u posebnu komoru za izgaranje, koja se – radi lakšeg paljenja – ne hladi pa je zato užarena.

4-taktni i 2-taktni motori

4-taktni motori imaju na svakom cilindru po dva ventila – usisni i ispušni.

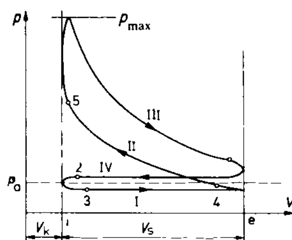
U prvom taktu (I) klip se giba od unutarnjeg (i – vidi sliku indikatorskog dijagrama na str. 240 lijevo) prema vanjskom mrtvom položaju (e) pri otvorenom usisnom i zatvorenom ispušnom ventilu. U cilindru se stvara podtlak, zbog čega u cilindar ulazi smjesa goriva i zraka (Otto), odnosno čisti zrak (Diesel). U drugom se taktu (II) – uz oba zatvorena ventila – smjesa odnosno čisti zrak

komprimira (od e do i). Slijedi paljenje smjese iskrom (Otto), odnosno paljenje goriva ubrizganoga u vrući zrak (Diesel), a zatim izgorjeli plinovi – uz još uvijek zatvorene ventile – potiskuju klip (od i do e) i vrše rad (treći takt – III). Konačno se otvara ispušni ventil, a pri ponovnom stapaju (od e do i) istiskuje klip izgorjele plinove iz cilindra (četvrti takt – IV).

2-taktni motori su većinom bez ventila. U njih se smjesa goriva sa zrakom (Otto) odnosno čist zrak (Diesel) tlači (pod malim pretlakom) u cilindar kroz raspore (za ispiranje), a izgorjeli plinovi se istiskuju kroz ispušne raspore. Svi se raspori otvaraju u odgovarajućem položaju klipa. 2-taktni motori imaju samo kompresijski i radni takt; ulaženje smjese odnosno zraka i ispiranje cilindra te istiskivanje plinova zbiva se za kratko vrijeme dok su raspori između oba takta otvoreni.

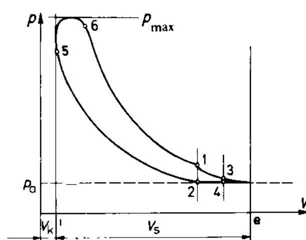
U usporedbi sa 4-taktnim motorima imaju 2-taktni slijedeće prednosti: veću snagu uz iste dimenzije, ventile nadomještene rasporima i jednoličniji zakretni moment; nedostaci su pak: veće toplinsko opterećenje uz iste dimenzije, potrebna je posebna pumpa za ispiranje (u malih su motora pumpe nadomještene pumpnim djelovanjem kartera), a u sistemu Otto još su i gubici zbog ispiranja izgorjelih plinova gorivom smjesom. Stoga su laki motori sistema Otto većinoma 4-taktni, a teški motori sistema Diesel obično 2-taktni.

Indikatorski dijagram



4-taktni motori sistema Otto

1 – otvaranje ispušnog ventila
2 – zatvaranje ispušnog ventila
3 – otvaranje usisnog ventila
4 – zatvaranje usisnog ventila
5 – paljenje električnom iskrom



2-taktni motori sistema Diesel

1 – otvaranje ispušnog raspora
2 – zatvaranje ispušnog raspora
3 – otvaranje raspora za ispiranje
4 – zatvaranje raspora za ispiranje
5 – početak ubrizgavanja goriva
6 – svršetak ubrizgavanja goriva

Barometarski tlak	p_a
Kompresijski omjer	$\varepsilon = V_e/V_i = (V_k + V_s)/V_k$
Volumen kompresijskog prostora	V_k
Stapajni volumen	$V_s = A s = \pi d^2/4 \cdot s$

gdje znače: A – površinu klipa, d – promjer klipa, s – stapaj.

Ekonomičnost motora s nntarnjim izgaranjem

S gorivom dovodimo u motor toplinski tok $\Phi_1 = B H_i$

gdje su: B – potrošak goriva u jedinici vremena (kg/s), H_i – donja ogrjevna moć goriva.

Zbog gubitaka pri izgaranju (nepotpuno izgaranje) samo dio te topline prelazi na izgorjele plinove.

Budući da se u unutrašnjosti cilindra stvaraju veoma visoke temperature (maksimalno do 2000 °C, a prosječno znatno niže), moramo motor hladiti, pa se zbog toga temperatura stijenki cilindara ustali na 250 . . . 350 °C. Hlađenje je u manjih motora obično zračno, a u većih vodeno. Upotreba zračnog hlađenja ograničena je zbog malog koeficijenta prijelaza topline α sa stijenki motora na zrak. Pri brzini rashladnog zraka v možemo računati s koeficijentom prijelaza α:

v (m/s)	1 . . . 2	5 . . . 10	20 . . . 30	40 . . . 50	60 . . . 100	100 . . . 200
α (W/m²K)	6 . . . 12	30 . . . 70	80 . . . 150	160 . . . 210	230 . . . 350	350 . . . 640

Pri hlađenju vodom najdjelotvornija je svježa rashladna voda okoline, koja se može ugrijati za 40 . . . 70 K do konačne temperature 70 . . . 80 °C. Pri hlađenju morskom vodom računamo s ugrijavanjem za 20 . . . 40K i konačnom temperaturom do 50 °C (iznimno i do 60 °C). Pri cirkulacijskom (optočnom) hlađenju vodom (vozila!) ugrijavanje je 7 . . . 10K, do konačne temperature 80 . . . 90 °C.

Mnogo topline odlazi iz stroja još uvijek s vrlo vrućim ispušim plinovima. Daljnji gubici nastaju zbog prigušivanja i propusnosti klipova i ventila.

Zbog nepotpunog izgaranja, hlađenja stroja, topline ispušnih plinova i ostalih gubitaka odvodimo iz stroja toplinski tok Φ_2. On se sastoji od eksergijskog dijela (neiskorištene topline koja bi se teoretski još mogla pretvoriti u mehanički rad) i dijela koji nije iskoristiv za pretvorbu u rad.

Unutarnja snaga motora P_i proizlazi iz razlike među dovedenim i odvedenim toplinskim tokom $P_i = \Phi_1 - \Phi_2$

Unutarnju snagu P_i određujemo neposredno pomoću prosječnog indiciranog tlaka p_{med} u cilindru

$$P_i = p_{med} d^2\pi/4 \cdot 2\, sn/z \cdot i = p_{med}\ V_i \cdot 2\, n/z$$

gdje su: d – promjer klipa, s – stapaj, n – brzina vrtnje, z – broj taktova (4 ili 2), i – broj cilindara (dvoradni cilindar vrijedi za dva), V_i – stapajni volumen svih cilindara.

Prosječni indicirani tlak p_{med} brzih motora ne možemo odrediti jednostavnim sredstvima. No možemo ga izračunati iz efektivne snage motora P

$$p_{med} = P/(V_i \cdot 2\, n/z \cdot \eta_m)$$

pri čemu efektivnu snagu motora P odredimo kočenjem, a mehaničku korisnost η_m pogonom motora iz stranog izvora. Prosječni indicirani tlak p_{med} kreće se između 5 . . . 9 bar.

Brzine vrtnje plinskih i dizelskih motora iznose 2 . . . 40 okr./s (120 . . . 2400 okr./min), lakih motora za vozila 50 . . . 100 okr./s (3000 . . . 6000 okr./min).

Prosječna brzina klipa $v = 2\,sn$ stabilnih motora ne premašuje vrijednost od 6 m/s, a motora za vozila doseže do 12 m/s (iznimno i do 18 m/s).

Unutarnja korisnost η_i je omjer između unutarnje snage P_i i dovedenog toplinskog toka $\Phi_1 = BH_i$; ovisi u prvom redu o kompresijskom omjeru ε (vidi str. 240):

$$\eta_i = P_i/BH_i = f(1 - k/\varepsilon^{\varkappa-1})$$

gdje znače: k – faktor, ovisan o načinu izgaranja (Otto: $k \approx 1$, Diesel: $k > 1$), $\varkappa$ – omjer specifičnih toplinskih kapaciteta ($= c_p/c_v$).

Unutarnja korisnost je dakle to veća što je veći kompresijski omjer ε. On je u motora sistema Otto vrlo ograničen zbog opasnosti od detonacije (kompresija gorive smjese!), dok u dizelskih motora taj omjer može biti znatno veći (kompresija zraka!):

motori sistema Otto — benzinski	$\varepsilon = 5 \ldots 8 (\ldots 9)$
— plinski	$\varepsilon = 6 \ldots 10$
motori s užarenom glavom	$\varepsilon = 8 \ldots 12$
dizelski motori	$\varepsilon = 12 \ldots 25 (\ldots 35)$

Efektivna snaga motora P iznosi

$$P = P_i \eta_m = BH_i \eta$$

gdje znače: η_m — mehaničku korisnost, η — cjelokupnu korisnost.

Mehanička korisnost η_m uzima u obzir gubitke zbog trenja u mehanizmu motora i pogon pomoćnih uređaja — električnog generatora za sistem paljenja (Otto) ili pumpe za ulje (Diesel), ventilatora za zračno hlađenje ili ventilatora i pumpe za vodu pri hlađenju vodom itd.

Cjelokupna korisnost η $\eta = \eta_i \eta_m = P/BH_i$

uzima u obzir sve gubitke u motoru koji su, u prosjeku, raspodijeljeni približno ovako:

gubici hlađenjem	28%	gubici zbog trenja itd.	10%
toplina ispušnih plinova	30%	(efektivna snaga stroja	30%)
ostali unutarnji gubici	2%		

Cjelokupna korisnost zavisi od opterećenja motora P i brzine vrtnje n, a iznosi u najpovoljnijem području rada:

kod lakih benzinskih motora	$\eta = 0{,}22 \ldots 0{,}25$
kod plinskih motora	$\eta = 0{,}27 \ldots 0{,}35$
kod motora s užarenom glavom	$\eta = 0{,}22 \ldots 0{,}26$
kod malih dizelskih motora	$\eta = 0{,}31 \ldots 0{,}34$
kod velikih dizelskih motora	$\eta = 0{,}35 \ldots 0{,}41$

KOMPRESORI

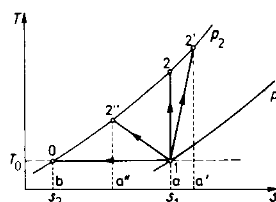
Kompresori su strojevi koji komprimiraju plinove ili pare na određeni tlak. Pomoću njih dobivamo komprimirani zrak koji služi za pogon pneumatskog alata (6 . . . 7 bar) ili metalurških peći itd. Daljnja upotreba kompresora su: daljinski transport plinova (36 bar), rashladni uređaji (12 bar), ukapljivanje zraka (200 bar), kemijski procesi (do 1000 bar i više).

Promjene stanja plina pri kompresiji

1. *Izotermna kompresija* (1 — 0)

Potrebni rad (a 1 0 b a)

$$W_{1,0} = m R T_0 \ln \frac{p_1}{p_2} = m T_0 (s_2 - s_1)$$



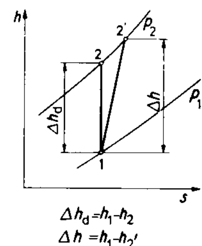
Konačna je temperatura $T_0 = T_1 =$ konst. Za vrijeme kompresije treba odvoditi toplinu (a 1 0 b a)

$$Q_0 = m T_0 (s_2 - s_1)$$

2. *Izentropska kompresija* (1 — 2) pri $s =$ konst (tj. bez izmjene topline s okolišem i bez unutarnjeg trenja).

Potrebni rad (a 2 0 b a)

$$W_{1,2} = m \Delta h_d = m c_p (T_1 - T_2) = = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]$$



Konačna temperatura

$$T_2 = T_1 - \frac{\Delta h_d}{c_p} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

3. *Adijabatska kompresija* (1 — 2') — politropska kompresija s eksponentom politrope $n > \kappa$ (postiže se približno kod brzohodnih kompresora bez hlađenja).

Potrebni rad (a' 2' 0 b a')

$$W_{1,2'} = m \Delta h = m c_p (T_1 - T_{2'}) = \frac{n}{n - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]$$

Konačna temperatura

$$T_{2'} = T_1 - \frac{\Delta h}{c_p} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n}$$

4. *Politropska kompresija* s eksponentom politrope $n < \kappa$ (1 — 2″) (postiže se približno kod hlađenih stapnih kompresora).

Potrebni rad (a 1 2″ 0 b a)

$$W_{1,2''} = n/n - 1 \cdot p_1 V_1 [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}]$$

Odvedena toplina (a 1 2″ a″ a) — Konačna temperatura

$$Q = (\kappa - n)/(\kappa - 1) \cdot W_{1,2''}/n \qquad T_{2''} = T_1 (p_2/p_1)^{(n-1)/n}$$

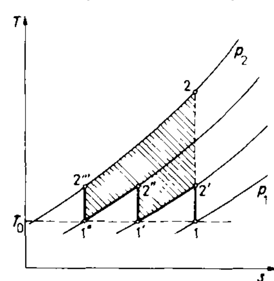
Uspoređivanjem različitih promjena stanja dobivamo:

$$W_{1,2'} > W_{1,2} > W_{1,2''} > W_{1,0} \qquad T_{2'} > T_2 > T_{2''} > T_0$$

Najmanji je rad potreban za izotermnu kompresiju ($W_{1,0}$), a najbliže smo joj pri obilnom hlađenju ($W_{1,2''}$). Najveći je rad potreban kod nehlađenih strojeva ($W_{1,2'}$).

Višestepena kompresija

Višestepena kompresija omogućuje da se, bez obzira na vrstu kompresora (hlađenoga ili nehlađenoga) vrlo približimo izotermnoj kompresiji.



Iza svakog stupnja kompresije hladimo ugrijani komprimirani plin po mogućnosti do početne temperature T_0. Time štedimo rad koji je predočen u Ts dijagramu (desno) šrafiranom površinom 2′ 1′ 2″ 1″ 2‴ 2 2′.

Višestepena kompresija s međuhlađenjem poskupljuje uređaj to više što je veći broj stupnjeva. Stoga se obično ograničujemo na 2 do 4 stupnja. Tlačni omjer svakog stupnja pri ukupno i stupnjeva je

$$x = \sqrt[i]{p_2/p_1}$$

Kompresija do visokih tlakova

Pri kompresiji na manje tlakove (do 30 bar) računamo s realnim plinovima kao da su idealni. Pri višim tlakovima moramo jednadžbu stanja korigirati faktorom k

$$pv = kRT$$

Vrijednosti faktora k iznose:

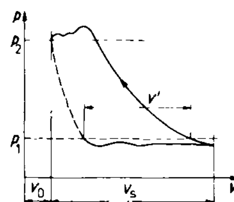
p	bar	0	100	300	600	1000
H_2	0 °C	1,0	1,07	1,20	1,42	1,71
	100 °C	1,0	1,05	1,16	1,33	1,56
zrak*	0 °C	1,0	0,97	1,09	1,46	1,98
	100 °C	1,0	1,03	1,15	1,39	1,80

* Za računanje sa zrakom kao pregrijanom parom vidi str. 169.

Stapni kompresori

Jednostepenim stapnim kompresorima postižemo tlak do 5 (...7) bar, a višestepenim postižemo u svakom stupnju tlačni omjer 3...4.

Indikatorski dijagram



Stapajni volumen iznosi

$$V_s = As = d^2\pi/4 \cdot s$$

gdje znače: A — presjek cilindra, d — promjer cilindra, s — stapaj.

Štetni prostor

$$V_0 = 0{,}04 \ldots 0{,}08 \ (\ldots 0{,}15) \ V_s$$

Dobavni volumen (pri tlaku p_1): V'

Dobava kompresora s obzirom na volumen plina pri početnom tlaku p_1 (ispred kompresora) iznosi kod jednoradnih kompresora

$$q_V = \lambda V_{s1} n_1 i_1$$

gdje znače: λ – stupanj dobave, V_{s1} – stapajni volumen u prvom stupnju (niskotlačnom), n_1 – brzinu vrtnje u prvom stupnju, i_1 – broj paralelno djelujućih cilindara u prvom stupnju (dvoradni cilindri računaju se dvostruko).

Stupanj dobave

$$\lambda = \lambda_0 \eta_V$$

određen je »volumetrijskom korisnošću« $\eta_V = V'/V_s$ (koja se znatno smanjuje povećavanjem štetnog prostora) i faktorom λ_0 (< 1) koji uzima u obzir ugrijavanje plina pri usisavanju te propusnost stapa i ventila.

Stupanj dobave iznosi:

kod malih kompresora	$\lambda > 0{,}70$
kod puhala (npr. za visoke peći)	$\lambda = 0{,}82 \ldots 0{,}90$
kod kompresora za tlak do 7 bar	$\lambda = 0{,}86 \ldots 0{,}92$

Pogonska snaga za kompresor

Unutarnja snaga P_i stapnih kompresora s hlađenim cilindrima približno je određena radom $W_{1,2''}$, potrebnim za politropsku kompresiju (vidi str. 244 pod 4), i to pri brzini vrtnje n

$$P_i = W_{1,2''} \cdot n$$

Pri tom zanemarujemo neznatni rad ekspanzije zaostalog plina iz štetnog prostora. (Rad $W_{1,2''}$ računamo s eksponentom politrope $n = 1{,}32 \ldots 1{,}38$.)

Zapravo se kompresija ne zbiva po politropi s konstantnim eksponentom n, već najprije približno po izentropi ($n \approx \kappa$), a zatim uz znatno odvođenje topline ($1 < n < \kappa$).

Unutarnju snagu za svaki cilindar određujemo također pomoću prosječnog indiciranog tlaka p_{med} u cilindru presjeka A i stapaja s pri brzini vrtnje n

$$P_i' = p_{med} A s n$$

Prosječni indicirani tlak p_{med} možemo izračunati iz rada $W_{1,2}''$ (ako uzmemo u obzir da je $V_1 = V_0 + V_s$)

$$p_{med} = W_{1,2}''/V_s$$

Ukupna unutarnja snaga za više cilindara iznosi

$$P_i = \sum P_i'$$

Stvarno potrebna snaga za pogon kompresora iznosi

$$P = P_i/\eta_m$$

gdje je mehanička korisnost stapnih kompresora $\eta_m = 0{,}78 \ldots 0{,}95$.

Turbokompresori

Turbokompresori su *radijalni* (po konstrukciji su slični turbopumpama) ili *aksijalni* (slični parnim turbinama).

U jednom se stupnju postižu samo manji kompresijski omjeri do 1,7 (... 4). Za više su tlakove potrebni višestepeni kompresori.

Kompresija se u turbokompresorima zbiva po adijabati (slučaj 3 na str. 243). Pri kompresijskim omjerima preko 2,5 porast je temperature tolik da je potrebno međuhlađenje.

Snaga za pogon turbokompresora

Teoretsku snagu određuju izentropski rad $W_{1,2}$ i brzina vrtnje n

$$P_0 = W_{1,2} \cdot n = q \Delta h_d$$

Unutarnja snaga je veća zbog unutarnjih gubitaka

$$P_i = W_{1,2}' \cdot n = q \Delta h = P_0/\eta_i$$

gdje je unutarnja korisnost

$$\eta_i = P_0/P_i = \Delta h_d/\Delta h$$

Stvarna snaga još je veća zbog vanjskih mehaničkih gubitaka (trenja)

$$P = P_i/\eta_m = P_0/\eta = q \Delta h_d/\eta$$

pri čemu je mehanička korisnost turbokompresora $\eta_m = 0{,}95 \ldots 0{,}98$, a cjelokupna korisnost $\eta = \eta_i \eta_m$.

Dobavna količina (protok mase) turbokompresora dobiva se iz stvarne snage P, cjelokupne korisnosti η i izentropske razlike entalpija Δh_d

$$q = \eta P/\Delta h_d$$

Dobavnu količinu možemo također izraziti početnim volumenskim protokom q_V i početnom gustoćom plina ϱ

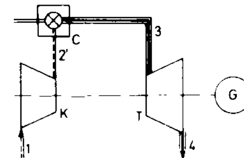
$$q = q_V \varrho$$

PLINSKE TURBINE

Plinske turbine u širem smislu su pogonska postrojenja koja se sastoje – pri otvorenom procesu – od kompresora, komore za izgaranje i turbine.

Kompresor K tlači zrak iz atmosfere u komoru za izgaranje C, u kojoj izgara gorivo ubrizgano neposredno u komprimirani zrak (pri konstantnom tlaku). Izgorjeli (dimni) plinovi struje nato kroz turbinu T koja dijelom svoje snage goni kompresor, a preostalom snagom generator G.

Kao gorivo možemo upotrijebiti jeftinija tekuća goriva, obično petrolej ili slično. Omjer potroška goriva B i protoka zraka q iznosi



$$B/q = 0{,}008 \ldots 0{,}012 \quad \text{(kg/kg)}$$

U komorama za izgaranje postižu se konačne temperature:

u stacionarnim strojevima	650 ... 700 °C
u mlaznim strojevima	700 ... 850 °C

Pri otvorenom procesu je q protok zraka kroz kompresor do komore za izgaranje, dok protok dimnih plinova koji nastaju u komori za izgaranje i struje kroz turbinu iznosi

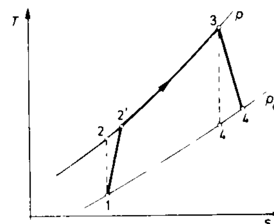
$$q' = q + B \approx q$$

a ujedno se neznatno mijenja specifični toplinski kapacitet c_p' dimnih plinova, pomoću kojeg računamo toplinski tok u komori za izgaranje i snagu turbine.

Kružni proces plinske turbine možemo prikazati pojednostavljeno (bez veće greške) pomoću kružnog procesa zraka (vidi dijagram T, s).

Promjene stanja zraka

- 1–2′: adijabatska kompresija od tlaka p_a na tlak p,
- 2′–3: dovođenje topline u komori za izgaranje pri tlaku p,
- 3–4′: adijabatska ekspanzija (s trenjem) u turbini od tlaka p na tlak p_a,
- 4′–1: odvođenje topline u okoliš pri tlaku p_a.



Za adijabatsku kompresiju treba kompresoru snaga

$$P_{ik} = q c_p (T_2 - T_1)/\eta_{ik} = q c_p (T_{2'} - T_1)$$

gdje su: q – protok zraka, c_p – specifični toplinski kapacitet zraka, η_{ik} – unutarnja korisnost kompresora, T_1 – početna temperatura zraka, T_2 – konačna temperatura pri izentropskoj kompresiji, $T_{2'}$ – stvarno postignuta konačna temperatura zraka (vidi str. 243).

Unutarnja koristnost kompresora iznosi

$$\eta_{ik} = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_{2'}) = 0{,}80 \ldots 0{,}87$$

Komori za izgaranje dovodimo toplinski tok

$$\Phi = BH_i \approx qc_p\,(T_3 - T_{2'})/\eta_c$$

gdje znače: B – potrošak goriva u jedinici vremena (kg/s), H_i – donju ogrjevnu moč goriva, T_3 – najvišu temperaturu u procesu (pri završetku dovođenja topline), η_c – korisnost gorionika.

Pri adijabatskoj ekspanziji dobivamo u turbini unutarnju snagu

$$P_{it} = q'c_p'\,(T_3 - T_4)/\eta_{it} = q'c_p'\,(T_3 - T_{4'})$$

gdje znače: q' – protok dimnih plinova ($\approx q$), c_p' – specifični toplinski kapacitet dimnih plinova ($\approx c_p$), T_4 – konačnu temperaturu pri izentropskoj ekspanziji, $T_{4'}$ – temperatura zraka kod izlaza iz turbine, η_{it} – unutarnju korisnost turbine.

Unutarnja korisnost turbine iznosi

$$\eta_{it} = (T_3 - T_{4'})/(T_3 - T_4) = 0{,}85 \ldots 0{,}88\ (\ldots 0{,}90)$$

Unutarnja korisna snaga cjelokupnog postrojenja plinske turbine iznosi

$$P_i = P_{it} + P_{ik}$$

(pri čemu upotrijebljena snaga u kompresuru P_{ik} ima negativnu vrijednost).

Stvarna korisna snaga cjelokupnog postrojenja plinske turbine je zbog vanjskih gubitaka (trenja u ležajima, pogon regulatora itd.) manja

$$P = P_i \eta_m$$

gdje je η_m mehanička korisnost postrojenja.

Cjelokupna korisnost postrojenja iznosi

$$\eta = P/BH_i = (P_{it} + P_{ik})/BH_i \cdot \eta_m$$

Cjelokupna korisnost η ovisi u prvom redu o omjeru obiju krajnjih temperatura T_3/T_1 (i to tako da raste s porastom tog omjera) i o tlačnom omjeru p/p_a. Svakom omjeru temperatura pripada određeni optimalni tlačni omjer pri kojem je η maksimalan, npr.

T_3/T_1	2,5	3	3,5
$(p/p_a)_{opt}$	3,6	5,8	8,3
η_{max}	0,18	0,22	0,24

Da bi se postigao što veći omjer temperatura, mora biti:

a) temperatura T_3 što viša, a ona je ograničena otpornošću materijala komore za izgaranje i turbine;

b) temperatura T_1 što niža, a ona ovisi o temperaturi okoline (stoga je korisnost veća zimi, u sjevernim zemljama ili na velikim visinama).

Poboljšanje cjelokupne korisnosti

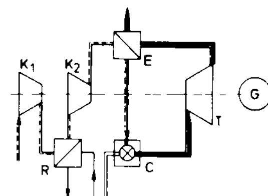
Cjelokupnu korisnost poboljšavaju:

a) višestupna kompresija s međuhlađenjem, čime smanjujemo potrebnu ukupnu snagu za pogon kompresora P_{ik};

b) višestupna ekspanzija s međuzagrijavanjem, što povećava ukupnu snagu turbina P_{it};

c) regeneracija topline, tj. upotreba vrućih izlaznih plinova iz posljednje turbine, za zagrijavanje zraka iza kompresora, što smanjuje toplinski tok Φ koji moramo dovoditi.

Da bi postrojenje plinske turbine (s otvorenim procesom) postalo što jednostavnije (a uređaji što manji i jeftiniji) zadovoljavamo se često samo s dva stupnja kompresije i jednim stupnjem ekspanzije.



Na slici su: K_1, K_2 – kompresori, R – hladnjak, E – izmjenjivač topline, C – komora za izgaranje, T – turbina.

*

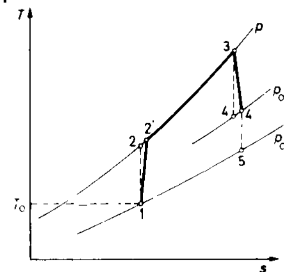
Mlazni (reaktivni) motori koji služe za pogon aviona imaju postrojenje s plinskom turbinom otvorenog procesa, a njen učin ne upotrebljava se samo za obavljanje vanjskoga mehaničkog rada na osovini turbine, već plinovi izgaranja stvaraju potisnu (reaktivnu) silu svojim mlazom na izlazu iz stroja kroz naročitu sapnicu.

Turbina mlaznog motora goni samo kompresor i troši

$$P_{it} = P_{ik}/\eta_m$$

gdje je η_m mehanička korisnost stroja u cjelini, a snage turbine i kompresora su:

$$P_{ik} = qc_p(T_1 - T_{2'})$$
$$P_{it} = q'c_p'(T_3 - T_{4'})$$



Zbog toga iz turbine istječu plinovi koji imaju još znatan pretlak spram okoline, $\Delta p = p_0 - p_a$ i zato imaju za ekspanziju do okolnog tlaka još uvijek na raspolaganju toplinski (izentropski) pad

$$\Delta h_d = h_{4'} - h_5 = c_{p'}(T_4 - T_5)$$

zbog kojega plinovi istječu kroz izlaznu sapnicu velikom brzinom v

$$v = \varphi\sqrt{2\,\Delta h_d}$$

(φ = koeficijent brzine, vidi str. 200), što daje potisnu silu

$$F = q'v = q'\varphi\sqrt{2\,\Delta h_d}\,.$$

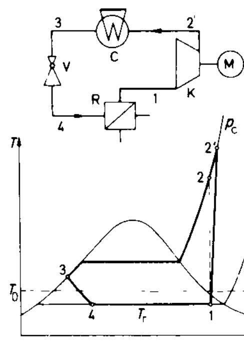
Za vrijeme leta ulazi u mlazni motor zrak pod velikim dinamičkim pritiskom što smanjuje potrebnu snagu kompresora i povećava potisnu silu mlaza.

TOPLINSKE PUMPE

Toplinske su pumpe uređaji kojima crpimo – uz dodavanje energije – toplinu s niže temperature na višu.

Kompresijske toplinske pumpe su strojevi za hlađenje i grijanje. Kružni proces u kompresijskim toplinskim pumpama obavljaju posebno odabrane pare, osobito razni freoni (npr. R 12 = difluordiklormetan CF_2Cl_2, R 22 = = difluormonoklormetan CHF_2Cl itd.), nadalje monoklormetan (metilklorid) CH_3Cl, diklormetan (metilenklorid) CH_2Cl_2, sumporni dioksid SO_2, ugljični dioksid CO_2, amonijak NH_3 i sl.

Jednostavna kompresijska toplinska pumpa:



K – kompresor, C – kondenzator (za okolinu: zagrijač), V – regulacijski (prigušni) ventil, R – isparivač, refrigerator (za okolinu: hladnjak), M – pogonski motor (električni ili drugi).

Promjene stanja pare:

1–2': adijabatska kompresija (s trenjem) od tlaka p_r na tlak p_c

2'–3: kondenzacija pri p_c = konst (odvođenje topline pri višoj temperaturi u okolinu)

3–4: prigušivanje u regulacijskom ventilu od tlaka p_c na tlak p_r ($h_3 = h_4$)

4–1: isparivanje pri p_r = konst (dovođenje topline pri niskoj temperaturi iz okoline).

Snaga za pogon kompresora (stvarna)

$$P = q(h_2 - h_1)/\eta = q(h_{2'} - h_1)/\eta_m$$

gdje znače: q – protok pare, h_1 – specifičnu entalpiju prije kompresije, h_2 – specifičnu entalpiju na kraju izentropske kompresije, $h_{2'}$ – stvarnu specifičnu entalpiju iza kompresora, η_m – mehaničku korisnost, η – cjelokupnu korisnost.

Odvedeni toplinski tok $\Phi_c = q(h_{2'} - h_3)$

Taj toplinski tok može poslužiti za grijanje okoline (»ogrjevni stroj«).

Faktor grijanja $\varepsilon_c = \Phi_c/P$

pokazuje koliko »ogrjevnog toka« Φ_c dobivamo upotrebljavajući snagu P za pogon kompresora. Pri malim tlačnim (i temperaturnim) razlikama taj je faktor znatno veći od 1, npr. $\varepsilon_c = 5 \ldots 15$ (i više).

Dovedeni toplinski tok $\Phi_r = q(h_1 - h_4)$

Taj toplinski tok služi za hlađenje okolice (»rashladni stroj«).

Rashladni faktor $\varepsilon_r = \Phi_r/P$

pokazuje koliko »rashladnog toka« Φ_r dobivamo upotrebljavajući snagu P za pogon kompresora. Pri malim tlačnim (i temperaturnim) razlikama i taj je faktor znatno veći od 1, npr. $\varepsilon_r = 3$ (i manje) do 12 (i više).

*

Apsorpcijske toplinske pumpe služe za apsorpcijske rashladne uređaje. U tu se svrhu iskorištava promjenljiva topivost nekoga rashladnog sredstva u određenom apsorpcijskom sredstvu. Najčešće se upotrebljava amonijak (NH_3) kao rashladno sredstvo, a voda (H_2O) kao apsorpcijsko sredstvo.

Jakost otopine izražavamo omjerom količine amonijaka i cjelokupne otopine

$$\xi = NH_3/(NH_3 + H_2O)$$

Najveću topivost (zasićenje) prikazuje maksimalni omjer ξ_{max}, koji ovisi o tlaku i temperaturi, a iznosi:

ξ_{max} pri tlaku bar	pri temperaturi (°C) −20	−10	0	+10	+20	+40	+60	+80	+100
0,2	0,364	0,306	0,253	0,202	0,155	0,068	–	–	–
0,5	0,475	0,406	0,347	0,294	0,244	0,152	0,071	–	–
1,0	0,615	0,512	0,438	0,378	0,325	0,228	0,140	0,062	–
2,0	–	0,701	0,566	0,483	0,418	0,314	0,225	0,141	0,067

Za otapanje je potrebna toplina otapanja r_a, koja je gotovo neovisna o tlaku i temperaturi, ali je ovisna o omjeru ξ:

ξ	0,00	0,25	0,50	0,75
r_a kJ/kg	837	641	209	42

Toplina isparivanja NH_3 (pri +20 °C) iznosi $r = 1189$ kJ/kg.

Za otapanje (apsorpciju) amonijaka u vodi odnosno u blagoj (nezasićenoj) otopini (malo ξ) potrebna je znatna toplina $r + r_a$ koju otopina oduzima okolini (te je »hladi«). Apsorpcijom nastaje jaka otopina (veliko ξ) iz koje opet izlučujemo amonijak grijanjem (višoj temperaturi odgovara manje ξ_{max}). Prije ponovnog otapanja moramo amonijak i preostalu blagu otopinu – svaku posebno – ohladiti najprije na temperaturu okoline, da bi nakon apsorpcije postigli temperaturu nižu od okoline.

Za grijanje u apsorpcijskom rashladnom uređaju trošimo znatno više energije nego – pri istom rashladnom učinu – za pogon kompresora u kompresijskoj toplinskoj pumpi.

Rashladne smjese

Sastavine		Sastavni dijelovi (težinski)	Temperatura početna °C	Temperatura konačna °C
voda	H_2O	16	+10	—12
amonijev klorid (salmijak)	NH_4Cl	5		
kalijev nitrat (salitra)	KNO_3	5		
voda	H_2O	1	+10	—15
amonijev nitrat	NH_4NO_3	1		
dušična kiselina (razr.)	HNO_3	2	+10	—20
natrijev nitrat (čilska sal.)	$NaNO_3$	3		
sumporna kiselina	H_2SO_4	4	+10	—20
natrijev sulfat	Na_2SO_4	5		
voda	H_2O	1	+10	—22
natrijev karbonat (soda)	Na_2CO_3	1		
amonijev nitrat	NH_4NO_3	1		
dušična kiselina (razr.)	HNO_3	4	+10	—40
amonijev nitrat	NH_4NO_3	5		
natrijev sulfat	Na_2SO_4	6		
snijeg	H_2O	2	0	—20
natrijev klorid (kuh. sol)	$NaCl$	1		
snijeg	H_2O	5	0	—25
kuhinjska sol	$NaCl$	2		
salmijak	NH_4Cl	1		
snijeg	H_2O	3	0	—30
sumporna kiselina (razr.)	H_2SO_4	2		
snijeg	H_2O	8	0	—32
solna kiselina (razr.)	HCl	5		
snijeg	H_2O	7	0	—35
dušična kiselina (razr.)	HNO_3	4		
snijeg	H_2O	4	0	—40
kalcijev klorid	$CaCl_2$	5		

Najniža ledišta vodenih otopina (eutektičnih)

5,9% Na_2CO_3	— 2,1 °C	36,9% $NaNO_3$	—18,5 °C
10,9% KNO_3	— 2,9 °C	22,4% NaCl*	—21,2 °C
19,7% KCl	—11,1 °C	20,6% $MgCl_2$	—33,6 °C
18,7% NH_4Cl	—15,8 °C	35,5% K_2CO_3	—37,1 °C
41,2% NH_4NO_3	—17,4 °C	29,9% $CaCl_2$	—55,0 °C

* Eutektična vodena otopina NaCl ima (pri 15 °C) gustoću ρ = 1170 kg/m³ i specifični toplinski kapacitet c_p (pri temperaturi t):

t	°C	−20	0	+20
c_p	J/kg K	3320	3341	3362

KLIMATIZACIJA I SUŠENJE

Klimatizacija

Svrha klimatizacije je održavanje temperature i vlage zraka u zatvorenoj prostoriji u granicama željenih vrijednosti.

Čovjek odaje toplinu i izlučuje vlagu koje (po VDI 2078 — 1977) iznose

— pri mirovanju i bez fizičkog rada:

Temperatura zraka °C	Odavanje topline W	Izlučivanje vlage g/h
18	125	35
20	120	35
22	120	40
24	115	60
26	115	65

— pri poluteškom radu iznosi odavanje topline 270 W.

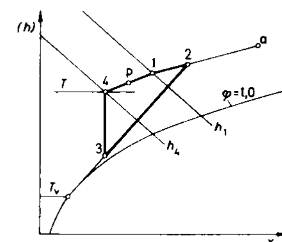
Klimatizacija obuhvaća niz postupaka pri kojima se iz klimatizirane prostorije P izlazeći vlažni zrak (stanja 1) miješa u mješaču M sa svježim zrakom iz atmosfere A (stanja a) u smjesu stanja 2 (koja je ovisna o omjeru miješanja 3:1...6:1); nakon čega će ta smjesa u hladnjaku H (ljetni rad) ili u zagrijaču G_1 i ovlaživaču V (zimski rad) promijeniti svoje stanje do stanja 3, da bi se u dogrijaču G_2 zagrijala do stanja 4, a tada je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

Stanje zraka u prostoriji P uzimamo kao točku miješanja p, dobivenu iz stanja ulaznog (4) i stanja izlaznog (1) zraka.

a) *Ljetni pogon*

Vanjski zrak treba hladiti i sušiti. Stoga je uključen hladnjak H, dok su zagrijač G_1 i ovlaživač V isključeni.

U hladnjaku H prelazi toplina sa smjese (stanja 2) na rashladnu vodu (temperature pod rosištem smjese), pri čemu se smjesa hladi i suši (od stanja 2 do stanja 3), a rashladna se voda zagrijava. Konačno stanje smjese na izlazu iz hladnjaka (stanje 3) ovisno je o njegovoj korisnosti. U dogrijaču G_2 osušena se smjesa zagrije do odgovarajuće temperature T (stanje 4), našto je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

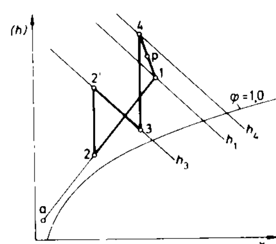


Pri prijelazu m (kg) smjese iz stanja 4 u stanje 1 smjesa preuzima iz prostorije

toplinu $Q = m \cdot \Delta h = m(h_1 - h_4)$

vlagu $m_v = m \cdot \Delta x = m(x_1 - x_4)$

b) *Zimski pogon*



Vanjski zrak valja zagrijavati i vlažiti. Stoga su uključeni zagrijač G_1 i ovlaživač V, dok je hladnjak H isključen.

U zagrijaču G_1 zagrijava se smjesa stanja 2 do stanja 2', u ovlaživaču V se vlaži i hladi do stanja 3. Nakon toga se smjesa dogrijava u dogrijaču G_2 do stanja 4, a tada je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

Pri prijelazu m (kg) smjese sa stanja 4 u stanje 1 smjesa predaje prostoriji toplinu

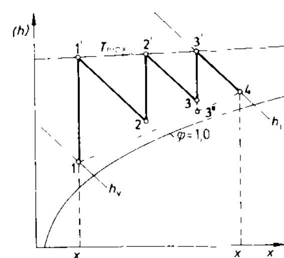
$$Q = m \cdot \Delta h = m(h_4 - h_1)$$

a preuzima od nje vlagu

$$m_v = m \cdot \Delta x = m(x_1 - x_4)$$

Sušenje vlažne tvari zagrijanim zrakom

Vlažnoj tvari, koja sadrži stanovitu količinu vode, treba smanjiti tu količinu vode do željene vrijednosti.



Zrak za sušenje (vanjski) neka ima ulaznu vlažnost x_v i ulaznu specifičnu entalpiju h_v (stanje 1). Zagrijavajući ga po izohigri (x = konst) do najviše dopuštene temperature T_{max} on prelazi u stanje 1'. Tako zagrijan zrak nato u sušionoj komori prima vlagu koja ishlapljuje iz vlažne tvari te se hladi po izentalpi (h = konst) do stanja 2.

Taj se postupak više puta ponavlja (2 – 2' i 2' – 3 i 3' – 4) do izlazne specifične entalpije h_i i izlazne vlažnosti x_i koja treba biti što većom.

Za zagrijavanje m_z (kg) zraka potrebna je toplina

$$Q = m_z(h_i - h_v)$$

a iz vlažne tvari je zrak preuzeo vlagu

$$m_v = m_z(x_i - x_v)$$

Pri optočnom postupku miješamo izlazni zrak (stanje 4) s ulaznim zrakom (stanje 1) u omjeru koji daje smjesu stanja npr. 3". Ta se smjesa zagrijava do stanja 3' i može u sušari preuzeti vlagu do stanja 4. Optok treba ponavljati do zatražene suhoće tvari.

ELEKTROTEHNIKA

Simboli

—	istosmjerna struja	——	vodič	3	tri paralelna vodiča
~	izmjenična struja		križanje vodiča	△	trokutni spoj
	istosmjerna i izmjenična struja		čvrsti spoj vodiča	Y	zvjezdasti spoj
≈	trofazni sistem		rastavljivi spoj vodiča		ispravljač, elekt. ventil
V	voltmetar		sklopka	(+)	galvanski izvor struje
A	ampermetar		otpor	G	istosmjerni generator
W	vatmetar		promjenljivi otpor	G ~	izmjenični generator
Ω	ommetar		osigurač	M	istosmjerni motor
f	mjerač frekvencije		namot	M ~	izmjenični motor
cosφ	cos φ – mjerač		namot s odvojcima	⊗	trošilo struje, rasvjetno tijelo
W	registrirajući vatmetar		kondenzator		uzemljenje
Wh	brojilo	+ –	polarizirani kondenzator		spoj s masom

ISTOSMJERNA STRUJA

Ohmov zakon

definira otpor R kao omjer napona U i struje I

$$R = U/I \qquad U = I\,R \qquad I = U/R$$

Djelatni (ohmski) otpor R upravno je razmjeran s duljinom l i obrnuto razmjeran s presjekom A vodiča

$$R = \varrho\, l/A \qquad \varrho = R/l \cdot A$$

ϱ = specifični otpor koji je karakterističan za svaki materijal.

Specifični otpor ϱ i presjek vodiča A mjerimo koherentnim jedinicama međunarodnog sustava jedinica (SI): Ω m (= Ω/m · m^2) ili izvedenom jedinicom Ω mm^2/m (A u mm^2).

Specifični otpor ϱ ovisi o temperaturi T. Specifični otpor ϱ_1 pri temperaturi T_1 povećava se pri temperaturi T_2 na ϱ_2 po formuli

$$\varrho_2 = \varrho_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

α = je temperaturni koeficijent električnog otpora mjeren u K^{-1}.

Koeficijent α također se mijenja s temperaturom, no te su promjene pri praktički važnim temperaturama tako neznatne da ga često možemo smatrati konstantnim. Specifični otpori ϱ_1 i temperaturni koeficijenti α određuju se obično pri temperaturi T_1 = 20 °C = 293 K, a sabrani su za najvažnije materijale na str. 257.

Djelatna (omska) vodljivost G je recipročna veličina omskom otporu R $\qquad G = 1/R = A/\varrho l$

Specifična vodljivost je $\gamma = 1/\varrho$.

Kirchhoffovi zakoni

I Zbroj struja koje dolaze u neku točku električne mreže jednak je zbroju struja koje iz te točke odlaze, tj. zbroj svih struja jednak je nuli

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0$$

II U svakom je zatvorenom krugu zbroj narinutih napona jednak zbroju umnožaka struja i pripadnih otpora (tj. zbroju padova napona)

$$\sum_{i=1}^{n} U_i = \sum_{i=1}^{n} (I\,R)_i$$

Snaga i rad istosmjerne struje

Snaga P istosmjerne struje jednaka je umnošku napona U i struje I

$$P = U\,I = I^2\,R = U^2/R$$

Rad W istosmjerne struje jednak je umnošku snage P i vremena t

$$W = Pt = U\,I\,t = I^2 R\,t$$

Specifični otpori ϱ, specifične vodljivosti γ i temperaturni koeficijenti električnog otpora α različitih materijala (pri 20 °C)

Materijal	Specifični otpor ϱ $\frac{\Omega\ mm^2}{m}$	Specifična vodljivost γ $\frac{m}{\Omega\ mm^2}$	Temperaturni koeficijent otpora α K^{-1}
aluminij – lijevani	0,040	25	0,0036
– meki	0,028	36	0,0040
– tvrdo vučeni	0,029	34,5	0,0041
bakar – meki	0,0175	57	0,00393
– tvrdo vučeni	0,0178	56	0,00392
bronca – aluminijska	0,13 ... 0,29	7,7 ... 3,4	0,0006 ... 0,001
– kositrena	0,0278	36	0,0040
cekas	1,12	0,894	0,00014
cekas I	0,97	1,03	0,00052
cekas II	1,08	0,925	0,00008
cink	0,060	16,8	0,0041
čelik	0,1 ... 0,25	10 ... 4	0,0045 ... 0,0055
– lijevani	0,142	7	–
– lim	0,13	7,7	0,0045
– »dinamo« lim	0,27 ... 0,67	3,7 ... 1,5	–
– žica	0,17	5,9	0,0052
kantal	1,45	0,69	0,00006
konstantan	0,5	2,0	−0,00005
kositar	0,12	8,3	0,0045
magnezij	0,043	23	0,0041
manganin	0,43	2,32	0,00001
mjed – lijevana	0,071	14	–
– vučena	0,07 ... 0,08	14 ... 12,5	0,0013 ... 0,0019
nikal	0,42	2,38	0,0002
nikelin	0,09	11	0,0055
novo srebro	0,38	2,63	0,00007
olovo	0,21	4,8	0,0041
platina	0,10	10	0,00392
silumin – lijevani	0,059	17	0,004
sivi lijev	0,6 ... 1,6	1,7 ... 6,3	–
srebro	0,0165	61	0,0040
volfram	0,055	18,1	0,0048
zlato	0,023	43,5	0,0040
željezo (čisto)	0,10	10	0,006
živa	0,958	1,04	0,00099

Za destiliranu vodu iznosi $\varrho \approx 10^{10}$ Ω mm^2/m,

a za morsku je vodu $\varrho = 3 \cdot 10^5$ Ω mm^2/m.

Spajanje djelatnih (omskih) otpora

a) Serijski spojeni otpornici pojedinačnih otpora R_i imaju ukupan otpor R jednak sumi pojedinačnih otpora (koji je veći od najvećeg otpora)

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

te propuštaju struju I_i koja je u svim otpornicima jednaka

$$I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$$

b) Paralelno spojeni otpornici pojedinačnih otpora R_i imaju ukupan otpor R koji je recipročna vrijednost zbroja recipročnih vrijednosti svih otpora (te je manji od najmanjega otpora), a dobiva se iz jednadžbe

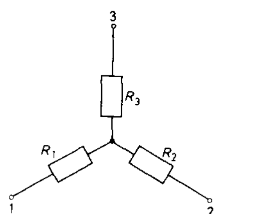
$$1/R = \sum_{i=1}^{n} 1/R_i = 1/R_1 + 1/R_2 + \ldots + 1/R_n$$

Ukupna struja I koju propuštaju jednaka je sumi struja I_i kroz pojedine otpornike

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$$

c) Električni spoj triju otpora

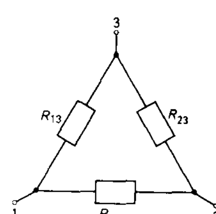
Spoj u zvijezdi (T-spoj)



Otpor među stezaljkama 1 i 2

$$R = R_1 + R_2$$

Spoj u trokutu (Π-spoj)

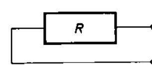


Otpor među stezaljkama 1 i 2

$$R = \frac{R_{12}(R_{23} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

Mjerenje temperature otporom

Termometri na otpor iskorišćuju ovisnost djelatnog otpora ϱ_T o temperaturi T (vidi str. 256)



$$\varrho_T = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

gdje su: ϱ_0 – specifični otpor pri temperaturi T_0 = = 273 K, t_0 = 0 °C, $(T - T_0)$ je dakle temperatura t u °C.

Naročito je pogodna za termometre na otpor platina, čiji je temperaturni koeficijent električnog otpora α linearno ovisan o temperaturi.

$$\alpha = (3907{,}841 - 0{,}578\,t)\ 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

t °C	α 10^{-6} K^{-1}	t °C	α 10^{-6} K^{-1}	t °C	α 10^{-6} K^{-1}
−220	4035,091	150	3821,080	550	3589,716
−200	4023,523	200	3792,159	600	3560,796
−150	3994,602	250	3763,239	650	3531,876
−100	3965,682	300	3734,318	700	3502,955
− 50	3936,761	350	3705,398	750	3474,035
0	3907,841	400	3676,478	800	3445,114
50	3878,921	450	3647,557	850	3416,194
100	3850,000	500	3618,637		

Termonaponi



Termički se naponi pojavljuju na lemljenim mjestima dviju kovina ili slitina. Oni rastu s porastom temperature, što se iskorištava za mjerenje temperature.

Termoelektrični naponski niz (s obzirom na platinu) za temperaturnu razliku među lemljenim mjestima 100 K (100 °C i 0 °C) iznosi:

Kovina (zlitina)	Termonapon mV	Kovina (slitina)	Termonapon mV
Bi	−7,7	Ir	+0,67
konstantan	−3,47 . . . −3,04	Ag	+0,67 . . . +0,79
Ni	−1,94 . . . −1,20	Cu	+0,72 . . . +0,77
Pt	0	Au	+0,56 . . . +0,80
platinrodij (10% Rh)	+0,65	Fe	+1,88
		kromnikal	+2,20
W	+0,65 . . . +0,90		

Termoelektrični naponi pri temperaturi T

za različite kovinske parove s obzirom na baždarne temperature 0 i 20°C

Temperatura t	Željezo — konstantan		Kromnikal — nikal		Platinrodij — platina	
°C	0 °C	20 °C	0 °C	20 °C	0 °C	20 °C
—200	—8,15	—9,20				
—150	—6,60	—7,65				
—100	—4,75	—5,80				
— 50	—2,51	—3,56				
0	0,00	—1,05	0,00	—0,80	0,000	—0,113
50	2,65	1,60	2,02	1,22	0,299	0,186
100	5,37	4,32	4,10	3,30	0,643	0,530
150	8,15	7,10	6,13	5,33	1,025	0,912
200	10,95	9,90	8,13	7,33	1,436	1,323
250	13,75	12,70	10,16	9,36	1,868	1,755
300	16,56	15,51	12,21	11,41	2,316	2,203
350	19,36	18,31	14,29	13,49	2,778	2,665
400	22,16	21,11	16,40	15,60	3,251	3,138
450	25,00	23,95	18,51	17,71	3,732	3,619
500	27,85	26,80	20,65	19,85	4,221	4,108
550	30,75	29,70	22,78	21,98	4,718	4,605
600	33,67	32,62	24,91	24,11	5,224	5,111
650	36,64	35,59	27,03	26,23	5,738	5,625
700	39,72	38,67	29,14	28,34	6,260	6,147
750	42,92	41,87	31,23	30,43	6,790	6,677
800	46,22	45,17	33,30	32,50	7,329	7,216
850	49,63	48,58	35,34	34,54	7,876	7,763
900	53,14	52,09	37,36	36,56	8,432	8,319
950			39,35	38,55	8,997	8,884
1000			41,31	40,51	9,570	9,457
1050			43,25	42,45	10,152	10,039
1100			45,16	44,36	10,741	10,628
1150			47,04	46,24	11,336	11,223
1200			48,89	48,09	11,935	11,822
1250			50,69	49,89	12,536	12,423
1300			52,46	51,66	13,138	13,025
1350					13,738	13,625
1400					14,337	14,224
1450					14,935	14,822
1500					15,054	14,941

Faradayevi zakoni

Faradayeva konstanta F je umnožak —

— Avogadrove konstante $N_A = 6{,}022\,05 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ i

— elementarnoga naboja $e \;= 0{,}160 \cdot 10^{-18}\ \text{A s}$

$$F = N_A\, e = 96\,353\ \text{A s/mol}$$

Elektrokemijski ekvivalent a određen je molskom masom m_m i valencijom v elementa te Faradayevom konstantom F

$$a = m_m/F v \qquad \text{kg/A s}$$

Vrijednosti elektrokemijskog ekvivalenta a (u mg/A s = 10^{-6} kg/A s) *nekih materijala*

Materijal*	a mg/A s	Materijal*	a mg/A s
aluminij	0,093 2	olovo	1,073 5
bakar — jednovalentni	0,658 8	platina	0,505 7
— dvovalentni	0,329 4	srebro	1,118 0
cink	0,338 7	zlato	0,681 2
kalij	0,405 2	željezo — dvovalentno	0,289 3
kositar — dvovalentni	0,615 1	— trovalentno	0,192 9
— četverovalentni	0,307 5	živa — jednovalentna	2,078 9
magnezij	0,126 0	— dvovalentna	1,039 5
natrij	0,238 4	*	
nikal — dvovalentni	0,304 1	kisik (anion)	0,082 9
— trovalentni	0,202 7	vodik (kation)	0,010 44

* Valencija se odnosi na vezu kovine u kemijskom spoju.

Prvi Faradayev zakon

Struja I koja protječe elektrolitom izlučit će na elektrodi u vremenu t masu m

$$m = a I t$$

gdje je a — elektrokemijski ekvivalent.

Drugi Faradayev zakon

Mase m_1 i m_2 različitih tvari, izlučene istom strujom u istom vremenu, odnose se međusobno kao kvocijenti relativnih atomskih masa A i kemijskih valencija v tih tvari

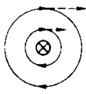
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{A_1/v_1}{A_2/v_2}$$

MAGNETSKO I ELEKTRIČNO POLJE

Magnetsko polje nastaje oko polova permanentnih magneta ili oko vodiča električne struje.

Jakost magnetskog polja H (A/m), koju najlakše određujemo mjerenjem električne struje I, iznosi

— na okomitoj udaljenosti r od beskonačno dugog vodiča $H = I/2\pi r$
— u sredini kružnog vodiča (= 1 zavoj) promjera d $H = I/d$
— u sredini svitka sa w zavoja na cilindru promjera d $H = Iw/d$
— u sredini svitka sa w zavoja na zatvorenom (npr. kružnom) prstenu (obodne) duljine l $H = Iw/l$



Smjer magnetskog polja određuje se »pravilom desnog vijka«: podudara li se smjer aksijalnog pomicanja vijka sa smjerom struje u vodiču, magnetsko će polje imati smjer okretanja vijka. (Znak ⊗ znači da promatrač gleda u smjeru struje, a znak ⊙ znači da gleda suprotno smjeru struje. Na slici struja ulazi okomito u ravninu crteža.)

Gustoća magnetskog toka (magnetska indukcija) B ($T = Vs/m^2$) je magnetski tok Φ (Vs) na jedinicu površine, što ga u različitim materijalima izaziva magnetsko polje jakosti H

$$B = \Phi/A = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

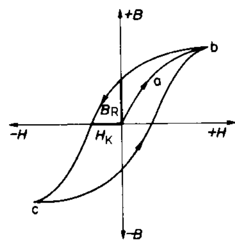
gdje su: A — presjek, μ — permeabilnost, μ_0 — permeabilnost praznog prostora (vakuuma), μ_r — relativna permeabilnost.

Permeabilnost praznog prostora μ_0 je konstanta

$$\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6} \quad Vs/Am.$$

Relativna permeabilnost μ_r (bezdimenzijski broj) ovisi o materijalu i jakosti magnetskog polja H.

U vakuumu (a to vrijedi praktički i za zrak) relativna je permeabilnost $\mu_r = 1$. Za feromagnetske materijale prikazujemo ovisnost gustoće magnetskog toka o jakosti magnetskog polja »krivuljom magnetiziranja« $B = f(H)$.



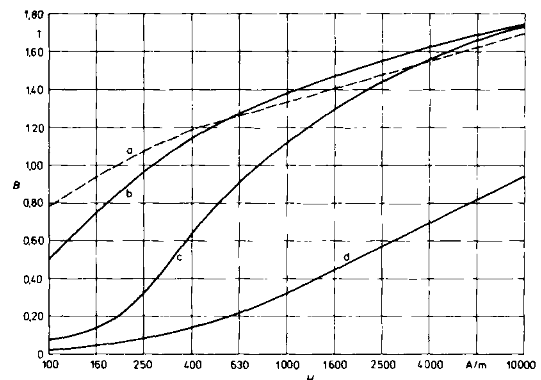
Prvo magnetiziranje čelika prikazuje početna (»djevičanska«) krivulja (a). Smanjimo li zatim jakost magnetskog polja do nule, ostat će u čeliku remanentni magnetizam B_R, koji možemo poništiti samo suprotnim magnetskim poljem jakosti H_K (»koercitivna sila«).

Magnetiziranjem čelika do zasićenja u jednom (b) i drugom smjeru (c) krivulja magnetiziranja opisuje petlju (»histereza«).

Čelici za permanentne magnete (magnetski tvrdi čelici) imaju vrlo široku histereznu petlju. Čelici pogodni za izmjenične magnete (magnetski meki čelici) imaju vrlo (praktički zanemarivo) usku histereznu petlju.

Krivulja magnetiziranja $B = f(H)$ za meki čelik i sivi lijev

Krivulja magnetiziranja $B = f(H)$ za meki čelik (I) i sivi lijev (II)



a — *transformatorski lim*
b — *dinamo-lim*
c — *čelični lijev*
d — *sivi lijev*

Nosivost magneta

Na nosivim polovima magneta magnetske indukcije B i površine A iznosi nosivost magneta F

$$F = B^2 A/2\mu_0$$

Induktivitet

Induktivitet L nekog svitka sa w zavoja može se prikazati kvocijentom promjene magnetskog toka Φ i struje I koja ga stvara

$$L = w\, d\Phi/dI$$

Svitak sa w zavoja kojemu je presjek A i duljina l ima induktivitet L

$$L = \mu_0 \mu_r w^2 A/l$$

Induktivitet svitka bez željezne jezgre (za zrak: $\mu_r = 1$) je dakle konstantan. Induktivitet svitka sa željeznom jezgrom zavisi od nagiba krivulje magnetiziranja ($\mu_0 \mu_r = B/H$).

Energija svitka iznosi

$$W_L = LI^2/2$$

Električno polje nastaje između međusobno izoliranih vodiča pod naponom (i općenito: oko svakog statičkog naboja).

Jakost električnog polja E (V/m) između dviju paralelnih ploča među kojima je napon U, a njihova udaljenost a, iznosi

$$E = \frac{U}{a}$$

Na ploči koja ima naboj Q (C) na površini A (m²), iznosi *gustoća naboja* D (C/m²)

$$D = \frac{Q}{A} = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

gdje su: ε – dielektričnost, ε_0 – dielektrična konstanta (dielektričnost vakuuma), ε_r – relativna dielektričnost izolatora.

Dielektrična konstanta praznog prostora ε_0 iznosi

$$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{A\,s/V\,m}$$

Dielektričnost izolatora ε_r zavisi od materijala (između ploča) i iznosi za vakuum $\varepsilon_r = 1$, za zrak $\varepsilon_r = 1{,}006$. Vrijednosti za različite izolatore sabrane su u slijedećoj tablici.

Specifični električni otpori, relativna dielektričnost i probojna čvrstoća električnih izolatora

Materijal	Specifični otpor ϱ Ω m	Relativna dielektričnost ε_r	Probojna čvrstoća kV/mm	Dopuštena maksimalna temperatura °C
asfalt	—	2,7	1,8 ... 15,8	100
bakelit	10^{10}	2,8	20	55 ... 100
guma — meka	—	2,7 ... 7	10 ... 30	–30 ... +60
— tvrda	10^{16}	3 ... 3,5	10 ... 30	–40 ... +80
kremen	$5 \cdot 10^{16}$	4 ... 4,8	35 ... 40	1050
mikanit	—	4,5 ... 5,5	20 ... 30	—
mramor	—	7 ... 9	1,4 ... 2,8	650
parafin	$10^{14} \dots 10^{16}$	2 ... 2,3	8 ... 20	—
polivinilklorid				
— elastični	10^{11}	3 ... 4	50	65
— tvrdi	10^{14}	3 ... 4	50	60 ... 70
porculan	$10^{9} \dots 10^{12}$	5 ... 6,3	30 ... 38	—
staklo	$5 \cdot 10^{7}$	4 ... 17	12 ... 20	—
šelak	10^{14}	2,9 ... 3,7	—	75
škriljevac	$10^{6} \dots 10^{12}$	6 ... 10	0,2 ... 0,4	—
tinjac	$10^{13} \dots 10^{15}$	6 ... 8	20 ... 60	—
tvrda ljepenka	$10^{8} \dots 10^{10}$	5 ... 6	10 ... 30	130
ulje (transformatorsko)	10^{10}	2 ... 2,5	8 ... 12	85

Kapacitet

Kapacitetom C definiramo omjer električnog naboja Q sabranog na dvjema elektrodama kondenzatora i napona U među njima

$$C = Q/U$$

Kondenzator kojemu je površina paralelnih ploča A, a razmak među njima a ima kapacitet C

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/a$$

Kapacitet kondenzatora ovisi dakle o relativnoj dielektričnosti ε_r materijala među pločama (izolatora).

Spoj više kondenzatora

a) u paralelnom spoju (povećava se površina ploča); daje ukupni kapacitet C

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

b) u serijskom spoju (povećava se razmak ploča) daje ukupni kapacitet C prema jednadžbi

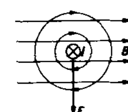
$$1/C = \sum_{i=1}^{n} 1/C_i = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n$$

Energija kondenzatora $$W_C = C U^2/2$$

Vodič električne struje u magnetskom polju

1. Sila F (N) koja djeluje na vodič električne struje jakosti I (A), u magnetskom polju gustoće B (T), na duljini l (m), iznosi

$$F = BIl$$

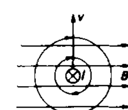


Sila F je usmjerena prema manjoj gustoći magnetskog polja koje rezultira iz magnetskog polja gustoće B i magnetskog polja što nastaje oko vodiča struje jakosti I.

Ta se sila F iskorištava u elektromotorima.

2. U vodiču duljine l (m) koji se giba brzinom v (m/s) kroz magnetsko polje gustoće B (T) inducira se napon U_i (V)

$$U_i = Bvl$$



Inducirani napon U_i uzrokuje struju takvoga smjera da se vodič giba brzinom v prema većoj gustoći magnetskog polja koje rezultira iz magnetskog polja gustoće B i magnetskog polja nastalog oko vodiča struje jakosti I.

Ako se magnetski tok Φ mijenja u vremenu t, u svitku sa w zavoja koji miruje inducirat će se napon

$$U_i = -w(\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t)$$

Na tome se induciranom naponu U_i osniva djelovanje električnih generatora.

IZMJENIČNA STRUJA

Izmjenični napon što nastaje u vodičima električnih generatora izaziva u zatvorenom strujnom krugu izmjeničnu struju određene frekvencije.

Frekvencija f izmjenične struje ovisi o broju pari polova p i brzini vrtnje n generatora $f = pn$

Normalna frekvencija izmjenične struje u Evropi je $f = 50$ Hz. Njoj odgovaraju slijedeći brojevi pari polova p i brzine vrtnje n koje se najviše upotrebljavaju:

Broj pari polova p	Broj polova $2p$	Brzina vrtnje n okr./s	Brzina vrtnje n okr./min	Broj pari polova p	Broj polova $2p$	Brzina vrtnje n okr./s	Brzina vrtnje n okr./min
1	2	50	3000	8	16	6,25	375
2	4	25	1500	10	20	5	300
3	6	16⅔	1000	12	24	4⅙	250
4	8	12,5	750	16	32	3,125	187,5
5	10	10	600	20	40	2,5	150
6	12	8⅓	500	24	48	2 1/12	125

Kružna frekvencija (pulzacija): $\omega = 2\pi f$

Otpor za izmjeničnu struju

Cjelokupni (prividni) otpor Z (impedancija) iznosi: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, gdje su: R – djelatni (omski) otpor, X – jalovi otpor (reaktancija).

Djelatni otpor za izmjeničnu struju – zbog potiskivanja (skin-efekta) – nije jednak djelatnom otporu za istosmjernu struju (vidi str. 256). Pri niskim frekvencijama, međutim, ta je razlika neznatna.

Jalovi je otpor $X = \omega L - 1/\omega C = X_L - X_C$

gdje su: induktivni otpor (induktancija) $X_L = \omega L$

kapacitivni otpor (kapacitancija) $X_c = 1/\omega C$

Spoj više jalovih otpora:

a) u serijskom spoju $X = \sum_{i=1}^{n} X_i$

$X_L = X_{L1} + X_{L2} + \ldots + X_{Ln} \qquad X_C = X_{C1} + X_{C2} + \ldots + X_{Cn}$

b) u paralelnom spoju $1/X = \sum_{i=1}^{n} 1/X_i$

$1/X_L = 1/X_{L1} + 1/X_{L2} + \ldots + 1/X_{Ln} \qquad 1/X_C = 1/X_{C1} + 1/X_{C2} + \ldots 1/X_{Cn}$

Kut faznog pomaka φ između struje i napona

$$\tan \varphi = X/R = (X_L - X_C)/R$$

Ako je $X_L > X_C$, struja vremenski zaostaje za naponom, ako je $X_L < X_C$, struja prethodi naponu za kut φ.

Jednofazni sistem

Struja I — $I = U/Z = U/\sqrt{R^2 + X^2}$

Snaga P — prividna snaga $P_z = UI$

djelatna snaga $P = UI\cos\varphi$

jalova snaga $P_x = UI\sin\varphi$

faktor snage $\cos\varphi = P/P_z = P/UI$

Rad W — $W = Pt = UIt\cos\varphi$

Trofazni sistem

Trofazni sistem izmjenične struje ima 3 napona kojima su faze međusobno pomaknute za kut $2\pi/3$ (= 120°).

Linijski napon U

Linijska struja I

Spoj u zvijezdi

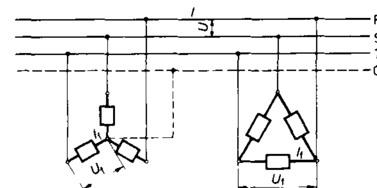
fazni napon $U_f = U/\sqrt{3}$

fazna struja $I_f = I$

Spoj u trokutu

fazni napon $U_f = U$

fazna struja $I_f = I/\sqrt{3}$



Spoj u zvijezdi *Spoj u trokutu*

Snaga P — prividna snaga $P_z = 3\,U_f I_f = \sqrt{3}\cdot UI$

djelatna snaga $P = \sqrt{3}\cdot UI\cos\varphi$

jalova snaga $P_x = \sqrt{3}\cdot UI\sin\varphi$

Rad W — $W = Pt = \sqrt{3}\cdot UIt\cos\varphi$

Pri računanju snage P i rada W faktor snage $\cos\varphi$ odnosi se na fazne vrijednosti U_f i I_f.

Transformacija izmjenične struje

Inducirani naponi U_i u primarnom i sekundarnom namotu transformatora odnose se kao njihovi brojevi zavoja w

$$U_{i1}/U_{i2} = w_1/w_2$$

Napon U_2 na stezaljkama sekundarnog namota je zbog gubitaka manji

$$U_2 < U_1\,(w_2/w_1)$$

Korisnost transformatora η, tj. omjer snage $P_2 = U_2 I_2$ (VA) sekundarne strane i snage $P_1 = U_1 I_1$ (VA) primarne strane, razmjerno je dobra (transformatori nemaju gibljivih dijelova):

za male snage (npr. 1 kVA) $\eta = 0{,}92$

za velike snage (npr. 1000 kVA) $\eta = 0{,}985$

ELEKTRIČNO GRIJANJE

Jouleova toplina Q (J) je toplina koja se razvija u vodiču otpora R (Ω) kojim teče struja I (A) u vremenu t (s)

$$Q = I^2 R t$$

Za električno se grijanje upotrebljavaju ponajviše slijedeći materijali:

a) za radne temperature 800 ... 1100 °C
slitine željeza, nikla i kroma (cekas, nikrom itd.)
— za kuhala, peći, industrijske peći;

b) za radne temperature do 1350 °C
slitine željeza, kroma, aluminija i kobalta (cekas ekstra, kantal itd.)
— za peći za žarenje, taljenje i temperovanje te peći u atmosferi sumpornih i drugih plinova;

c) za radne temperature do 1450 °C
karborundni štapovi (silit, silikarbon do 1400 °C, kvarcilit do 1450 °C drugi)
— za peći keramičke industrije, peći za taljenje, laboratorijske peći itd.;

d) za radne temperature do 1700 °C
rodij, molibden, volfram (Mo i W u redukcijskoj atmosferi!)
— za laboratorijske peći;

e) za radne temperature do 2300 °C
elektrografit
— za elektrode električnih peći itd.

Osnovni podaci češće upotrebljavanih otporničkih materijala za grijanje

Materijal	Specifični otpor Ω mm²/m	Temperaturni koeficijent otpora K^{-1}	Maksimalna radna temperatura °C	Talište °C
cekas	1,08	0,000 25	930	1370
cekas I	0,97	0,000 52	—	—
cekas II	1,06	—	1100	1400
cekas ekstra	1,40	0,000 05	1300	1500
nikrom	1,12	0,000 17	930	1350
nikrom V	1,08	0,000 09	1100	1400
kantal A	1,35	0,000 08	1300	1530
kantal A_1	1,45	0,000 06	1350	1530
omaks	1,66	0,000 035	—	1500

Toplina q (J/s mm²) što je otpornička žica za grijanje predaje u jedinici vremena s jedinice površine pri različitim temperaturama žice iznosi približno:

Temperatura žice °C	Toplina q J/s mm²	Temperatura žice °C	Toplina q J/s mm²
700 ... 800	0,02	1000	0,006 ... 0,008
900	0,01	1100	0,004 ... 0,006

Dopuštena opterećenja okrugle žice cekas II na šamotnoj podlozi pri temperaturi žice oko 800 °C:

Struja I* A	Promjer žice mm	Otpor R_1* Ω/m	Dulj. masa g/m	Struja I* A	Promjer žice mm	Otpor R_1* Ω/m	Dulj. masa g/m
1,58	0,25	23,60	0,4	8,46	0,90	1,82	5,3
1,95	0,30	16,50	0,6	10,09	1,00	1,48	6,5
2,35	0,35	12,00	0,8	12,10	1,10	1,22	7,8
2,80	0,40	9,25	1,0	13,81	1,20	1,02	9,3
3,44	0,45	7,30	1,3	15,51	1,30	0,87	11,0
3,99	0,50	5,90	1,6	17,21	1,40	0,76	12,8
4,52	0,55	4,88	2,0	18,90	1,50	0,65	14,7
5,06	0,60	4.10	2,3	21,08	1,60	0,58	16,7
5,60	0,65	3,50	2,7	25,08	1,80	0,45	21,0
6,16	0,70	3,10	3,2	29,21	2,00	0,37	26,1
6,76	0,75	2,62	3,7				
7,29	0,80	2,31	4,2				

* Pri 800 °C.

Proračun peći

Za traženu snagu električnih grijalica P uz napon U **određuje se struja**

$$I = \frac{P}{U}$$

Za struju I odabere se iz tablice odgovarajući promjer žice i njezin otpor R_1 za duljinu žice 1 m (Ω/m).

Iz ukupno potrebnog otpora R (Ω)

$$R = \frac{U^2}{P}$$

proračuna se potrebna duljina odabrane žice l (m)

$$l = \frac{R}{R_1}$$

ELEKTRIČNA RASVJETA

Svjetlosni tok Φ (lm) je ukupna količina svjetlosti koju rasvjetno tijelo emitira u svim pravcima.

Svjetlosna jakost I (cd) je svjetlosni tok Φ na jedinicu prostornog kuta ω

$$I = \Phi / \omega$$

Prostorni kut ω je dio prostora koji obuhvaća plašt isječka kugle polumjera r ako je A osnovica isječka

$$\omega = A / r^2$$

Rasvijetljenost (osvijetljenost) E (lx) je gustoća svjetlosnog toka Φ kojom izvor svjetlosti osvjetljuje površinu A

$$E = \Phi / A = I / r^2$$

Rasvijetljenost opada dakle s kvadratom udaljenosti od izvora svjetlosti.

Luminancija (sjajnost) B (cd/m^2) je svjetlosna jakost koju izvor svjetlosti zrači s jedinice svoje površine.

*

Potrebna rasvijetljenost E (lx) prostorija

Vrsta rada	Opća rasvjeta		Lokalna i opća rasvjeta		
	osrednja	na najnepovoljnijem mjestu	radnog mjesta	opća: osrednja	opća: na najnepovolj. mjestu
grubi	20... 40	10	50... 100	20	10
osrednji	40... 80	20	100... 300	30	15
fini	75...150	50	300...1000	40	20
vrlo fini	150...300	100	1000...5000	50	30

Pod pojedinim se vrstama rada razumijevaju:

grubi rad — lijevanje, kovanje, zemljani radovi i sl.
osrednji rad — normalni rad na alatnim strojevima, zidanje i sl.
fini rad — precizni rad na strojevima, montaža, čitanje, pisanje i sl.
vrlo fini rad — fina mehanika, graviranje, crtanje i sl.

Potreban svjetlosni tok Φ za osvjetljenje površine A rasvijetljenošću E

$$\Phi = EA / \eta$$

gdje korisnost rasvjete η ovisi o naravi i načinu postavljanja rasvjetnog tijela te o obliku i boji zidova i stropa (veća je pri svjetlijim zidovima):

direktna rasvjeta $\eta = 0{,}40 \ldots 0{,}55$
indirektna razvjeta $\eta = 0{,}15 \ldots 0{,}35$

Svetlosni tok Φ žarulje s kovinskom niti snage P (kod 220 V)

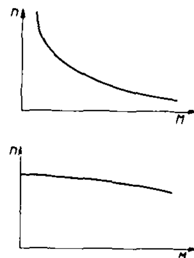
P(W)	15	25	40	60	100	200	300	500	1000	1500	2000
Φ(lm)	112	194	322	555	1070	2500	4070	7550	17100	27500	42000
Φ/P(lm/W)	7,5	7,8	8,1	9,3	10,7	12,5	13,6	15,1	17,1	18,3	21,0

ELEKTROMOTORI

Motori istosmjerne struje

1. *Serijski motori* (imaju uzbudni namot vezan u seriji s rotorskim namotom).

Serijski motori imaju »meku karakteristiku«. Pri porastu opterećenja raste moment M na osovini, a brzina vrtnje n pada. Obrnuto: rasterećeni motor teži da »pobjegne«.



Pokretni je moment M_a znatno veći od nazivnoga (300% i više).

Upotreba: električna vuča (električne željeznice, tramvaj, trolejbus), dizala itd.

2. *Paralelni (poredni) motori* (imaju uzbudni namot vezan paralelno s rotorskim namotom).

Paralelni motori imaju »tvrdu karakteristiku«. Pri opterećenju — tj. pri povećanju momenta M — brzina se vrtnje n mijenja samo neznatno.

Pokretni je moment M_a također veći od nazivnoga.

3. *Kompaundni motori* su kombinacija serijskog i paralelnog motora.

Upotreba: za veće snage (npr. za pogon u valjaonicama).

*

Promjenu smjera vrtnje motora istosmjerne struje postižemo zamjenom stezaljki uzbudnog ili rotorskog namota.

Brzinu vrtnje istosmjernih motora reguliramo mijenjanjem uzbude (ekonomično) ili otpornikom u seriji s rotorskim namotom (neekonomično) ili mijenjanjem priključenog napona.

Motori izmjenične struje

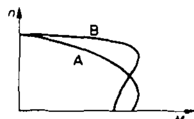
1. *Trofazni asinhroni motori* djeluju na principu okretnog magnetskog polja.

Statorski i rotorski namoti međusobno su odvojeni: statorski je vezan na trofaznu mrežu, a rotorski je zatvoren u svomu krugu, i to:

a) *kolutni* asinhroni motor ima rotorski namot spojen — preko kliznih koluta — na otpore pokretača;

b) *kavezni* asinhroni motor ima rotorski namot — u obliku kaveza — kratko spojen. To je najjednostavniji motor i zato u velikoj upotrebi.

Trofazni asinhroni motor ima tvrdu karakteristiku.



Krivulja A vrijedi za uključene otpore pokretača, B za kratko spojeni rotor (otpori isključeni).

Pokretni je moment znatan (120...250% nazivnoga).

Struja pokretanja trofaznih asinhronih motora je vrlo velika. Kod kratko spojenih rotora (kavezni motori) može postići osmerostruku vrijednost nazivne struje. Zato se za iole veće jedinice upotrebljava kolutni motor, koji pokrećemo uz uključene otpore (manja struja pokretanja!), a zatim otpore postupno isključujemo. Kod kaveznih motora veće snage struju pokretanja smanjujemo posebnom preklopkom »zvijezda-trokut«.

Brzinu vrtnje možemo regulirati otporima u rotorskom krugu (samo kod kolutnih motora, redovno neekonomično). Gruba regulacija brzine vrtnje moguća je, međutim, mijenjanjem broja statorskih polova preklapanjem (kod kolutnih i kaveznih motora).

Smjer vrtnje možemo promijeniti međusobnom zamjenom bilo kojih dviju faza na stezaljkama statora.

2. *Trofazni sinhroni motor* ima stator s trofaznim namotom, priključenim na mrežu, i rotor s nizom polova – permanentnih magneta (za manje snage) ili elektromagneta napajanih preko kliznih koluta istosmjernom strujom iz posebnog izvora (za veće snage).



Brzina vrtnje n je konstantna – sinhrona, ovisna samo o frekvenciji mreže, a neovisna o opterećenju (momentu M).

Pri opterećenjima većim od graničnoga (M_{max}) sinhroni motor ispada iz koraka te se zaustavlja.

Sinhroni motor ne može sam krenuti (osim u specijalnoj izvedbi). Treba ga dovesti na sinhronu brzinu (npr. posebnim motorom).

Upotreba: tamo gdje je potrebna potpuno konstantna brzina vrtnje, pri znatnijim opterećenjima i za korekciju faznog pomaka.

3. *Jednofazni asinhroni motor* stvara okretno magnetno polje radnim i posebnim pomoćnim namotom statora. Jednofazni motor ima također tvrdu karakteristiku, a pokretni moment iznosi 30 ... 200% nazivnoga.

Upotreba: kao mali motori u industriji i kućanstvu.

4. *Kolektorski motor* ima kolektor (komutator) (poput istosmjernih motora) koji omogućuju regulaciju brzine vrtnje u širokim granicama (ali je skuplji od asinhronih motora). Brzina se vrtnje regulira:

- regulacijskim transformatorom priključeni između motora i mreže,
- odvojcima na statorskim namotima,
- pomicanjem četkica.

Karakteristike kolektorskih motora slične su karakteristikama motora istosmjerne struje: serijski kolektorski motor ima meku karakteristiku, paralelni kolektorski motor ima tvrdu karakteristiku.

Upotreba: gdje god je potrebna regulacija brzine vrtnje kod motora izmjenične struje (papirna i tekstilna industrija, dizala, električne željeznice itd.).

Snaga elektromotora

Snaga elektromotora koji iz mreže troši struju jakosti I pri naponu U (linijske vrijednosti, v. str. 267), iznosi:

za istosmjernu struju	$P = \eta_{mot} UI$
za jednofazni sistem	$P = \eta_{mot} UI \cos\varphi$
za trofazni sistem	$P = \eta_{mot}\sqrt{3} \cdot UI \cos\varphi$

Korisnosti elektromotora η_{mot} iznose:

Vrsta struje	Za snagu motora P kW			
	do 1	2...10	10...50	50...100
istosmjerna jednofaz. sist.	0,65...0,78	0,78...0,86	0,86...0,90	0,90...0,93
trofaz. sistem	0,80	0,85...0,88	0,88...0,91	0,91...0,92

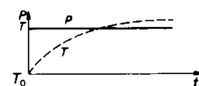
Izbor elektromotora

Pri izboru snage motora za određeni pogon odlučno je zagrijavanje motora. Zbog toga možemo motor kratkotrajno opteretiti znatno više nego je njegova nazivna snaga u trajnom pogonu.

Razlikujemo razne vrste pogona motora, od kojih su najkarakterističnije slijedeće (prikazane dijagramima u kojima su: P – snaga, T_0 – temperatura okoline, T – temperatura, t – vrijeme):

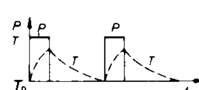
1. *Trajni pogon*

Motor radi bez prekida i postiže konačnu stacionarnu temperaturu koja ne smije premašiti dopuštenu maksimalnu temperaturu.



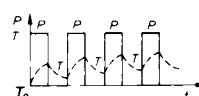
2. *Kratkotrajni pogon*

Motor radi kratkotrajno (npr. 10, 30 ili 60 min), tako da za vrijeme rada smije postići dopuštenu maksimalnu temperaturu, a za vrijeme mirovanja potpuno se ohladi na temperaturu okoline.



3. *Prekidni pogon*

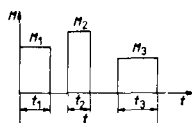
Motor radi u kraćim periodima rada i mirovanja, tako da smije za vrijeme rada postići dopuštenu maksimalnu temperaturu, ali se za vrijeme prekida ne ohladi na temperaturu okoline.



S obzirom na klasu izolacije motora može temperatura dostići vrijednosti: 90, 105, 120, 130, 155, 180 °C (ili i više).

Pri izboru snage motora za neki pogon vrijedi približno

$$M = \sqrt{\sum (M_n^2 t_n)/t}$$



gdje su: M — za izbor motora odlučan jednoliki moment vrtnje u vremenu t, M_n — pojedini momenti vrtnje u pojedinim vremenima t_n.

Uz približno iste brzine vrtnje vrijedi to i za snagu P

$$P = \sqrt{\sum (P_n^2 t_n)/t}$$

ELEKTRIČNI VODOVI NISKOG NAPONA

Pad napona u u vodu je razlika između napona U_0 na izvoru električne struje i napona U kod potrošača

$$u = U_0 - U$$

Uzmemo li presjek žice A (mm^2), duljinu voda (ne žice!) l (m), specifični otpor materijala ϱ (Ω mm^2/m) te jakost struje I(A), odn. snagu el. struje P(W), napon U(V) i fazni pomak φ na mjestu potrošnje (za trofazni je sistem U linijski napon, vidi str. 267!), iznosit će pad napona u (V) u vodu niskog napona položenom u cijevi ili kablu:

za istosmjernu struju $u = (2l/A)\varrho I = (2l/A)\varrho P/U$

za jednofazni sistem $u = (2l/A)\varrho I\cos\varphi = (2l/A)\varrho P/U$

za trofazni sistem $u = (l/A)\varrho\sqrt{3}\cdot I\cos\varphi = (l/A)\varrho P/U$

Iz tih jednadžbi možemo izračunati presjek žice A za određeni dopušteni pad napona u.

Kod niskonaponskih je zračnih vodova za izmjeničnu struju pad napona u nešto veći zbog dodatnog induktivnog otpora. U tom slučaju valja proračunane vrijednosti za pad napona u pomnožiti faktorom iz tablice:

cos φ	Presjek žice mm^2						
	10	16	25	35	50	70	95
0,9	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8
0,8	1,15	1,24	1,36	1,5	1,7	1,9	2,2
0,7	1,2	1,32	1,5	1,7	1,9	2,2	2,6

Dopušteni pad napona izražen u postocima nazivnog napona mreže iznosi:

— za skupni dovod od uvoda do električnog brojila $< 1\%$

— za rasvjetne instalacije od brojila do koje god svjetiljke $< 2\%$

— za motorne instalacije od brojila do motora $< 5\%$

Zaštita vodova

Vodovi moraju biti zaštićeni od preopterećenja osiguračima (ili rasklopkama) da se ne bi prekomjerno ugrijali.

Najveća dopuštena trajna struja u vodičima (= nazivna struja osigurača)

Presjek vodiča mm^2		Nazivna struja rastalnih osigurača A			Presjek vodiča mm^2		Nazivna struja rastalnih osigurača A		
Cu	Al	I	II	III	Cu	Al	I	II	III
0,75	—	—	10	16	25	35	80	100	125
1	—	10	16	20	35	50	100	125	160
1,5	2,5	16	20	25	50	70	125	160	200
2,5	4	20	25	35	70	95	—	200	225
4	6	25	35	50	95	120	—	225	260
6	10	35	50	63	120	150	—	260	300
10	16	50	63	80	150	185	—	300	350
16	25	63	80	100	185	240	—	350	430
					240	—	—	430	500

I: izolirani vodiči istoga strujnog kruga, položeni u izolacione cijevi;

II: cijevni (oklopljeni) vodiči, kabelski ili višežilni vodiči koji nisu položeni u cijevima, višežilni savitljivi priključni vodovi;

III: jednožilni izolirani vodiči, slobodno položeni u zraku, jednožilni spojni vodovi u rasklopnim postrojenjima, goli vodovi presjeka do 50 mm^2 Cu ili 70 mm^2 Al.

Sve vrijednosti navedene u tablici vrijede za temperaturu okoliša do 25 °C. Pri višim temperaturama valja ove vrijednosti pri vodovima, izoliranim gumom ili termoplastom, odgovarajuće sniziti (pri 40 °C za 25 odn. 18%, pri 55 °C za 62 odn. 42%).

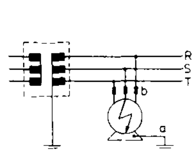
Zaštitne mjere u niskonaponskim postrojenjima

Oštećenjem električnih strojeva i naprava mogu vanjski dijelovi postrojenja doći pod napon i time u slučaju dodira dovesti u opasnost osoblje koje njima rukuje. Po propisima JUS o postrojenjima s naponom do 65 V prema zemlji nisu zaštitne mjere potrebne, izuzev kod ručnih svjetiljki i drugih električnih naprava u kotlovima i sličnim tijesnim prostorima. U postrojenjima s naponom od 65 do 250 V prema zemlji zaštitne su mjere potrebne tamo gdje je prelazni otpor čovjeka prema zemlji smanjen zbog vlage, topline i kemijskih utjecaja, u prostorijama s kamenim ili betonskim podom, kod metalnih konstrukcija itd. Za napone preko 250 V potrebne su zaštitne mjere u svakom slučaju.

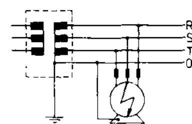
U niskonaponskim postrojenjima (do 1 kV) primjenjujemo slijedeće zaštitne mjere:

1. *Zaštitno izoliranje.* Da bi se u slučaju kvara na električnim postrojenjima izbjegla opasnost od dodira onih metalnih dijelova koji bi tom prilikom mogli doći pod napon (kućišta sklopki, ručice polužnih prekidača itd.), prevlačimo ih izolacijskim materijalom ili polažemo po tlu prostirače od gume ili plastičnih masa. Treba onemogućiti istovremeni dodir eventualno bliske vodovodne instalacije.

2. *Primjena malog napona.* U vlažnim prostorijama, kotlovnicama, garažama i sl., a osobito za prenosiva trošila (ručne svjetiljke, male motore i dr.) upotrebljavamo napon najviše do 42 V, tzv. »mali napon«. Obično ga dobivamo transformatorom (s odijeljenim namotima!), a kod istosmjerne struje akumulatorom. Važno je da strana malog napona bude galvanski potpuno odvojena od primarne strane i da ne bude uzemljena.



3. *Uzemljenje.* Uzemljenje (a) ima zadatak da se u slučaju kvara na trošilu, kad vanjski dijelovi dođu pod napon, strujni krug zatvori kroz zemlju i da ta struja izbacivanjem osigurača (b) sama prekine napajanje defektnog trošila. Da bi se to osiguralo, otpori uzemljenja moraju biti dovoljno maleni. Zato se uzemljenje većih trošila iz ekonomskih razloga izbjegava.



4. *Nulovanje.* Nulovanje je spajanje dijelova postrojenja koje želimo zaštititi na uzemljeni neutralni vodič. Time se postiže da svaki spoj sa zaštićenim dijelom ostane kratki spoj i da struja kratkog spoja izazove isklapanje defektnog trošila. Valja paziti da vodovi budu dimenzionirani tako da pri kratkom spoju između faznog vodiča i nulvoda uistinu teče struja koja će sigurno isklopiti.

5. *Primjena sistema zaštitnih vodova.* U prostorno ograničenim mrežama (tvornice, rudnici) s vlastitim generatorima ili transformatorima (s odijeljenim namotima) gdje je važno održavati pogon i u slučaju dozemnog spoja jedne faze, vežu se trošila na »sistem zaštitnih vodova« (metalne konstrukcije zgrada, vodovod, tračnice i sl.) koji je uzemljen.

6. *Zaštitne sklopke.* Kod s t r u j n e zaštitne sklopke, pri kojoj je trošilo uzemljeno, struja defekta kroz uzemljivač prouzrokuje aktiviranje sklopke. Kod n a p o n s k e sklopke, pri kojoj je trošilo uzemljeno kroz samu sklopku, dolazi do isklopa kad se na kućištu trošila zbog defekta pojavi određeni napon.

ELEKTRIČNA OPREMA MOTORNIH VOZILA

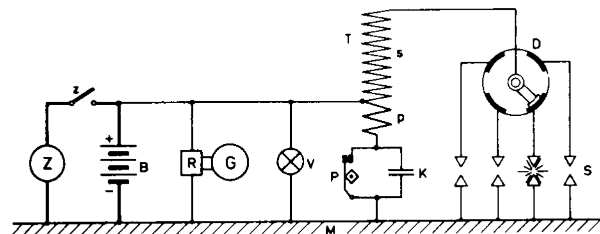
Motorna vozila gone gotovo isključivo motori s unutarnjim izgaranjem sistema Otto ili Diesel (str. 255). Za njihovo djelovanje i za dodatne svrhe vozilu je potrebna električna oprema koja se sastoji u prvom redu iz:

— akumulatorske baterije (B)
— pokretača (Z)
— generatora (G) s regulatorom (R)
— potrošača u vozilu (V),

a pri motorima sistema Otto još i iz

— uređaja za paljenje: indukcionog svitka (T), prekidača (P) s kondenzatorom (K), razvodnika (D) i svjećica (S).

Nazivni napon instalacije je 6, 12, 24 V.



Pokretač

Motori s unutarnjim izgaranjem ne mogu krenuti sami od sebe. Valja ih pokrenuti posebnim pokretačem, tj. elektromotorom ili pomoću komprimiranog zraka i sl.

Pri motornim vozilima je pokretač redovno istosmjerni serijski elektromotor kojega napaja akumulator. Uklapanje pokretačke sklopke (tzv. »brave«) (z) redovno je na elektromagnetski način.

Potrebna pokretna struja je veoma velika (nekoliko stotina A, iznimno i 1000 A). Posebno je zimi opterećenje najveće kako za akumulatorsku bateriju (u kojoj niske temperature smanjuju brzinu reakcije elektrokemijskoga procesa), tako i za motor (u kojem niske temperature povećavaju trenje u ležajima zbog viskoznijega maziva i koče rasplinjavanje i paljenje goriva). Zbog velike pokretne struje smije pokretač biti u pogonu samo kratko vrijeme.

Pokretač je u spoju s motorom vozila samo za vrijeme pokretanja. Kad motor samostalno krene, pokretač se od njega odvoji, o čem se brine posebni rasklopni uređaj.

Generator i regulator

Generator motornog vozila služi za punjenje akumulatorske baterije u kojoj se skuplja za pokretanje potrebna električna energija, a njom se napajaju i ostali potrošači u vozilu (signalne svjetiljke, zvučni signali, farovi itd.). Pri Otto-motorima generator dobavlja i struju za uređaj za paljenje.

Generator je vezan neposredno s motorom vozila. Stoga je njegova brzina vrtnje isto tako promjenljiva kao i brzina motora, što znači, da generator proizvodi vrlo promjenljivi napon. Da bi se dobio potreban jednoliki napon, generatoru je priključen *generatorski regulator* koji upravlja njegovim pravilnim djelovanjem.

Generator može biti istosmjerni (dinamo) ili izmjenični (alternator). Izmjenični generator mora imati još i ispravljač.

Uređaj za paljenje

Motori s unutarnjim izgaranjem sistema Otto trebaju još i uređaj za paljenje kojim se stvaraju iskre na svjećicama motora. U tu je svrhu potrebna struja visokog napona koju proizvodi indukcioni svitak.

Indukcioni svitak je u stvari transformator s primarnim (p) i sekundarnim (s) namotajem. Kroz primarni namotaj teče istosmjerna struja (nazivnog napona instalacije), koja sama ne može inducirati napon u sekundarnom krugu. Za to je potreban *prekidač* struje tako vezan s motorom, da prekine primarnu struju u trenutku potrebne iskre na svjećici. Trenutak nastanka iskre (pretpaljenje!) udešava se relativnim pomakom prekidnog batića s obzirom na njegov pogon s osovine. Za vrijeme pogona motora nastajanje iskre prilagođava se brzini vrtnje motora centrifugalnom regulacijom, a u ovisnosti od podtlaka u usisnoj cijevi motora. Preve [illegible] kidača (na »platinama«, koje su od volframa ili slične kovinske slitine) smanjuje *kondenzator* koji uz to inducira viši napon.

Prekinućem primarne struje smanjuje se u svitku za paljenje magnetsko polje, što izazove u sekundarnom krugu inducirani napon koji je — zbog velikog broja sekundarnih zavoja — veoma visok (do 30 kV). Struja visokog napona vodi se nato u razvodnik koji je prenosi na svjećice. Elektrode na svjećicama su razmaknute za 0,5 . . . 0,7 mm, što je prilagođeno mogućnosti preskoka jake iskre. Razvodnik je vezan s motorom tako da iskrenje na svjećicama odgovara potrebnom rasporedu djelovanja pojedinih cilindara motora.

*

Pri savremenijim motorima s unutarnjim izgaranjem izveden je uređaj za paljenje na principu elektronike.

Akumulatori

Električni akumulatori su sabirači električne energije u kemijskom obliku. Osim posebnih izvedbi akumulatora (kao npr. alkalnih sa čeličnom odn. kadmijevom i nikalnom elektrodom i dr.) najrašireniji je olovni akumulator.

Olovni akumulator ima – u svakoj akumulatorskoj ćeliji – po dvije elektrode od olova u razrijeđenoj sumpornoj kiselini kao elektrolitu. Obje se elektrode u elektrolitu oblože olovnim sulfatom $PbSO_4$.

Pri punjenju akumulatora (dovođenjem istosmjerne struje) nastaju na pozitivnoj elektrodi (kao anodi) olovni dioksid PbO_2 (smeđi), na negativnoj elektrodi (kao katodi) čisto olovo Pb (sivo), dok se u elektrolitu povećava koncentracija sumporne kiseline H_2SO_4. Pri pražnjenju (kad pozitivna elektroda djeluje kao katoda, a negativna elektroda kao anoda) proces je suprotan.



$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \underset{\text{pražnjenje}}{\overset{\text{punjenje}}{\rightleftarrows}} PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4$$

Za vrijeme punjenja i pražnjenja mijenja se gustoća ϱ elektrolita:

stanje akumulatora		prazan	normalan	pun
gustoća ϱ	kg/dm^3	1,12... 1,14	1,20... 1,24	1,26... 1,285
	^{0}Bé	15,5 ...17,7	24,1 ...27,9	29,8 ...32,0

Priključni napon akumulatorske ćelije je ≈ 2 V. Pri kraju punjenja dostiže napon do 2,4 V, ali pri početku pražnjenja mjesta padne na ≈ 2,15 V, da bi se potom ustalio za [illegible] napon padne do 1,8 V, valja pražnjenje prekinuti.

2,4
V
2,2
U
2,0
1,8
a
b
(20 h) t

a – punjenje
b – pražnjenje

Kapacitet akumulatora je određen količinom elektriciteta (A h) koju akumulator može dati pri pražnjenju. On je ovisan o veličini i kakvoći aktivnih površina olovnih ploča i njihovom broju u svakoj akumulatorskoj ćeliji.

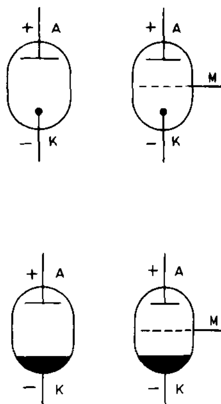
Kapacitet akumulatora se smanjuje s porastom struje tokom pražnjenja. Nazivni je kapacitet određen strujom pri kojoj se napunjeni akumulator prazni 20 sati.

Nikal-kadmijski akumulator djeluje po elektrokemijskom sistemu Ni-hidroksid-Cd te može biti hermetski zatvoren. Nazivni je napon 1,2 V, a pražnjenje valja prekinuti pri napon 1 V. Kao elektrolit služi kalijeva lužina (KOH).

Električni ventili

Električni ventili posjeduju svojstvo da provode struju u jednom smjeru (pri malom otporu), dok je u suprotnom smjeru sprečavaju (pri velikom otporu). Prema izradi možemo ih podijeliti na glavne skupine: elektronke, živine ventile i poluvodičke ventile.

Elektronke su zrakoprazne (evakuirane) cijevi u kojima su ugrađene anoda A i katoda K, a pri upravljanim elektronkama još i mrežica za upravljanje M.



Iz užarene katode giblju se u praznom prostoru elektroni prema anodi, što znači da elektronka propušta struju u smjeru od anode (+) prema katodi (−), dok je u suprotnom smjeru ne propušta.

Napon na mrežici za upravljanje vrlo jako utječe na tok elektrona. Već i mala promjena napona U_M na mrežici izaziva veliku promjenu struje I kroz elektronku.

S obzirom na razne izvedbe elektronki može teći među anodom i katodom struja $I = 10^{-2} \ldots 10^2$ A pri znatnom naponu $U = 10 \ldots 0{,}5 \cdot 10^6$ V.

Živini ventili su zrakoprazne cijevi u kojima je katoda živa, dok su u prostoru cijevi ioni živinih para. »Paljenje« (električni spoj među katodom i anodom) treba izvesti posebnom napravom.

I u živinim ventilima teče struja samo u smjeru od anode ka katodi.

Struja u živinim ventilima znatno je veća nego u elektronkama: $I = 10 \ldots 10^5$ A, i to pri naponu U do 10^6 V.

Poluvodički ventili

P o l u v o d i č i su tvari koje se po vodljivosti nalaze među vodičima (kovinama) i izolatorima.

Primjeri specifičnog otpora ϱ u Ω mm²/m:

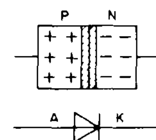
Vodiči	srebro Ag	$\approx 10^{-2}$	Poluvodiči	silicij Si	$10^2 \ldots 10^{10}$
	željezo Fe	$\approx 10^{-1}$		germanij Ge	$10^2 \ldots 10^6$
Izolatori	porculan	$\approx 10^{18}$			
	tinjac	$\approx 10^{20}$			

Pod različitim utjecajima imaju poluvodiči svojstva vodiča ili su bliže izolatorima.

Poluprovodički ventili (diode, tranzistori, tiristori) su zbog svojih dobrih fizikalnih svojstava i razmjerno niske cijene nadomjestili druge vrste ventila na praktično svim područjima.

Diode

Diode su neupravljani ventili, sastavljeni od dvaju slojeva poluvodiča – zone P i zone N:



– zona P nastaje, ako je u monokristalu 4-valentnoga poluvodiča (npr. Ge) prisutan 3-valentni elemenat (npr. In). Time nastaju u kristalnoj rešetki elektronske praznine, koje daju kristalu pozitivan naboj;

– zona N nastaje, ako je u monokristalu 4-valentnoga poluvodiča prisutan 5-valentni elemenat (npr. Sb). Tada uzrokuju slobodni elektroni u kristalnoj rešetki negativan naboj.

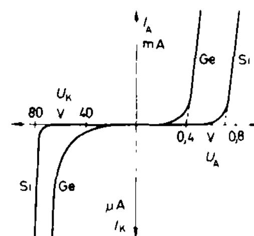
Pri neposrednom dodiru zona P i N u jednostrukom kristalu nastaje na granici obiju zona »zaporni sloj«.

Na strani zone P ima dioda anodu A, a na strani zone N katodu K.

S m j e r p r o v o d n o s t i

Priključi li se na anodu prema katodi pozitivni napon U_A, smanjit će se zaporni sloj.

Pri difuzijskom naponu (pri Ge diodi: 0,2 . . . 0,4 V, pri Si diodi: 0,6 . . . 0,8 V) pojavit će se struja I_A, koja s daljnjim povišenjem napona U_A raste vrlo brzo. (Plosnata izvedba dioda omogućuje struju: pri Ge diodi do 100 A, pri Si diodi do 500 A i više.)



Z a p o r n i s m j e r

Priključi li se na anodu prema katodi negativni napon U_K, zaporni sloj će se raširiti i propustiti samo malenu struju (pri Ge u µA, pri Si u nA). Pri visokom (»probojnom«) naponu poraste struja I_K skokomice (te može uništiti diodu).

Porast temperature zapornog sloja smanjuje napon U_A i povećava struju I_K.

Zbog karakterističnog svojstva dioda, da izrazito provode struju samo u jednom smjeru, upotrebljavaju se u prvom redu za ispravljače.

Ispravljači

Izmjeničnu struju ispravljamo u istosmjernu pomoću motor-generatora, kontaktnih ili elektroničkih ispravljača.

Kontaktni ispravljači su elektroničke sklopke, koje su sklopljene samo za vrijeme jedne polovine perioda izmjenične struje. Sklopkama upravlja bregasta osovina koja se vrti sinhrono s frekvencijom ulaznog napona. Brzo istrošenje dijelova smanjuje ekonomičnost tih ispravljača koja ograničuje njihovu upotrebu jedino na područje jačih struja ($I = 10^3 \dots 10^5$ A pri naponu od $U = 50 \dots 10^3$ V).

Za elektronske ispravljače se upotrebljavaju pretežno poluvodički ventili, napose diode (za struje do 2000 A pri naponu do 4000 V).

Spojevi ispravljača

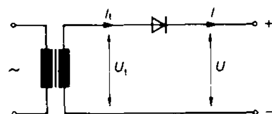
Ispred ispravljača gotovo redovno je najprije transformator koji transformira struju i napon na vrijednost, prikladnu za ispravljač i ujedno izolira izlaz ispravljača od mreže.

Nepoželjne vremenske oscilacije ispravljene struje smanjuju se ispravljačkim filtrima koji se sastoje iz otpora, kondenzatora i prigušnice (induktiviteta). Još veća stabilnost struje postiže se pomoću dodatnih elektroničkih stabilizatora napona ili struje.

U slijedećim shemama znače:

- U_t — izlazni napon transformatora (V)
- I_t — izlaznu struju transformatora (A)
- P_t — snagu transformatora (VA)
- U — istosmjerni napon (V)
- I — istosmjernu struju (A)
- R, L — otporno i induktivno opterećenje
- U_c — opterećenje suprotnim naponom (kondenzatorima, akumulatorima i istosmjernim motorima).

1. Jednosmjerni spoj



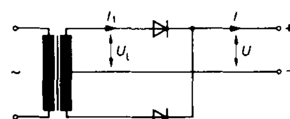
	R, L	U_c
$U_t \approx$	$2{,}22\ U$	$0{,}85\ U$
$I_t \approx$	$1{,}57\ I$	$2{,}1\ I$
$P_t >$	$3{,}1\ UI$	$1{,}73\ UI$

(Poluvalno ispravljanje)

2. Središnji spoj

	R, L	U_c
$U_t \approx$	$1{,}11\ U$	$0{,}8\ U$
$I_t \approx$	$0{,}78\ I$	$1{,}11\ I$
$P_t >$	$1{,}48\ UI$	$1{,}48\ UI$

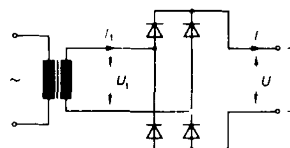
(Punovalno ispravljanje)



3. Mosni spoj

	R, L	U_c
$U_t \approx$	$1{,}11\ U$	$0{,}8\ U$
$I_t \approx$	$1{,}11\ I$	$1{,}57\ I$
$P_t >$	$1{,}24\ UI$	$1{,}24\ UI$

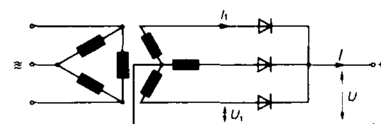
(Punovalno ispravljanje)



4. Središnji zvjezdasti spoj

	R, L	U_c
$U_t \approx$	$0{,}86\ U$	$0{,}77\ U$
$I_t \approx$	$0{,}58\ I$	$0{,}75\ I$
$P_t >$	$1{,}35\ UI$	$1{,}57\ UI$

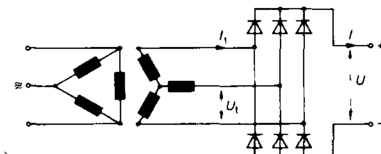
(Trofazno poluvalno ispravljanje)



5. Mosni zvjezdasti spoj

	R, L	U_c
$U_t \approx$	$0{,}74\ U$	$0{,}74\ U$
$I_t \approx$	$0{,}82\ I$	$0{,}82\ I$
$P_t >$	$1{,}05\ UI$	$1{,}05\ UI$

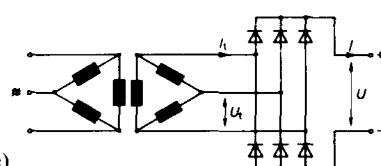
(Trofazno punovalno ispravljanje)



6. Mosni trokutni spoj

	R, L	U_c
$U_t \approx$	$0{,}74\ U$	$0{,}74\ U$
$I_t \approx$	$0{,}82\ I$	$0{,}82\ I$
$P_t >$	$1{,}05\ UI$	$1{,}05\ UI$

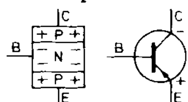
(Trofazno punovalno ispravljanje)



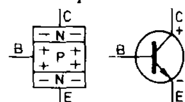
Tranzistori

Bipolarni tranzistor (ukratko: tranzistor) je monokristalni germani ili silicijev poluprovodni element s tri zone, različitog tipa vodljivosti, k slijede jedna drugu. Razlikujemo dva tipa tranzistora:

Tip PNP



Tip NPN



Poluprovodne elektrode

— središnja zona: baza (B)
— vanjske zone: emiter (E)
kolektor (C)

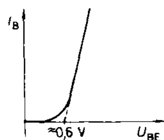
Baza je elektroda koja služi za upravljanje. Njenom strujom I_B upravlj kolektorska struja I_C. (Pri tom može struja I_B biti 100 ili više puta manj od struje I_C.)

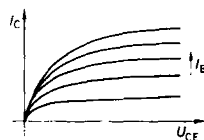
Emiterska je struja I_E zbroj bazne i kolektorske struje

$$I_E = I_B + I_C$$

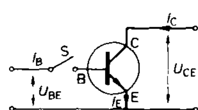
Bazna struja I_B ovisna je od napona između baze i emitera U_{BE}, kolektorsk struja I_C je ovisna od bazne struje I_B i napona između kolektora i emitera U_{CE}

$I_B = f_1(U_{BE})$ $I_C = f_2(I_B, U_{CE})$





Tranzistori se upotrebljavaju za pojačala i kao sklopke.



Tranzistor kao pojačalo (sklopka S uključena): $I_C = f(I_B)$.

Tranzistor kao sklopka (sklopka S isklopljena): $I_C = 0$, $I_E = 0$.

(Lijeva shema je pojednostavljena i samo načelna.)

Niskofrekventni tranzistori pojačavaju niskofrekventne (kao i istosmjerne) struje ($U < 100$ V, $I < 500$ mA) uz faktore pojačanja $\beta (= \Delta I_C / \Delta I_B) = 30 \ldots 300$.

Tranzistori snage pojačavaju (ili preklapaju) struje do 100 A pri naponu od više stotina V.

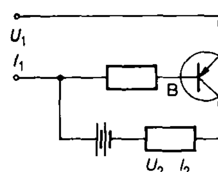
Osnovni tranzistorski spoji

U_1 – ulazni izmjenični signal
U_2 – izlazni izmjenični signal
R_E – otpor emitera
R_C – otpor kolektora
U_B – istosmjerni napojni napon

	Emiterski spoj	Kolektorski spoj	Bazni spoj
Pojačanje			
- napona	100 . . . 10000	< 1	100 . . . 10000
- struje	10 . . . 500	10 . . . 500	< 1
- snage	1000 . . . 100000	10 . . . 500	100 . . . 10000
Otpor			
- ulazni	10 Ω . . . 5 kΩ	500 Ω . . . 5 MΩ	< 1 Ω . . . 1 kΩ
- izlazni	10 Ω . . . 500 kΩ	10 Ω . . . 1 kΩ	100 kΩ . . . 10 MΩ
Fazni pomak	180°	0°	0°

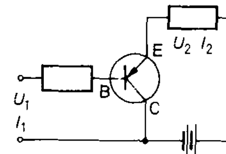
Jednostavni stupanj pojačanja

Pojačanje napona



$U_2 > U_1$
$I_2 \approx I_1$

Pojačanje struje



$U_2 \approx U_1$
$I_2 > I_1$

Tiristori

Tiristori (upravljane diode) su četveroslojni poluprovodni elementi, opremljeni elektrodom za upravljanje, a po djelovanju slični sklopkama (sa stanjem »isključeno« i »uključeno«). Upotrebljavaju se za regulaciju pri upravljanim ispravljačima i za isklapanje velikih snaga (svaka jedinica po više desetina kW).

MJERENJE ELEKTRIČKIH VELIČINA

S obzirom na vremenski promjenljive pojave pri mjerenju električnih veličina valja razlikovati pojmove:

Trenutna vrijednost u_t je vrijednost izmjenične veličine u bilo kojem promatranom trenutku.

Prosječna vrijednost u_{sr} je aritmetička prosječna vrijednost apsolutnih iznosa trenutnih vrijednosti.

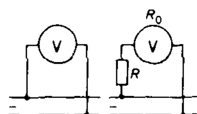
Efektivna vrijednost u je kvadratni korijen iz sume kvadrata trenutnih vrijednosti

$$u_t = f(t) \qquad u_{sr} = \frac{1}{T}\int_0^T |f(t)|\,dt \qquad u = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt}$$

Električna mjerila

1. *Mjerilo s okretnim svitkom* mjeri linearnu prosječnu vrijednost istosmjerne struje. Kod njega je otklon kazaljke α upravno razmjeran s istosmjernom strujom I kroz mjerilo: $\alpha = cI$ (c = konst). Upotrebljava se kao mjerilo napona i struje.

Mjerilo istosmjernog napona (voltmetar)

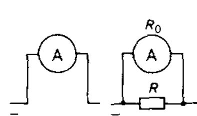


Mjerno područje mjerila napona (45 mV ... 1500 V) može se povećati n-puta dodavanjem predotpora R

$$R = R_0(n - 1)$$

R_0 – unutarnji otpor mjerila.

Mjerilo istosmjerne struje (ampermetar)

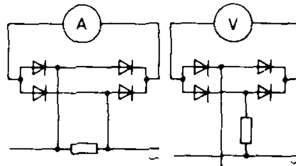


Mjerno se područje mjerila struje (1 mA ... 1000 A) može povećati n-puta uključivanjem porednog otpora (shunt) R

$$R = R_0/(n - 1)$$

R_0 – unutarnji otpor mjerila.

Mjerilo izmjeničnog napona ili struje mora biti opremljeno ispravljačem.



Mjerilo pokazuje prosječnu vrijednost koja je jednaka efektivnoj samo u slučaju čistih sinusnih veličina.

Pri mjerenju izmjenične struje upotrebljavaju se pri velikim strujama ili visokim naponima strujni odn. naponski reduktori (transformatori).

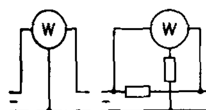
Točnost mjerila

Mjerna greška %	±0,1	±0,2	±0,5	±1,0	±1,5	±2,5	±5,0
Klasa točnosti	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	5,0

2. *Mjerilo s okretnim željezom* mjeri kvadratnu prosječnu vrijednost odnosno efektivnu vrijednost mjerene veličine. Otklon kazaljke α upravno je razmjeran s kvadratom struje I kroz mjerilo: $\alpha = cI^2$ (c = konst). Skala za efektivnu vrijednost je kvadratna.

Mjerilo s okretnim željezom upotrebljivo je za istosmjernu i izmjeničnu struju. Pri mjerenju napona (voltmetar) može se mjerno područje povećati predotporima, dok se pri mjerenju struje (ampermetar) ne upotrebljavaju poredni otpori već se umjesto toga podijeli magnetski namotaj na više odsjeka za više mjernih područja).

3. *Elektrodinamička mjerila*

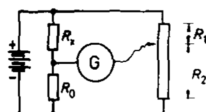


a) Elektrodinamičko mjerilo mjeri umnožak dviju veličina. Otklon kazaljke $\alpha = cI_1I_2$ (c = konst). Upotrebljava se za mjerenje snage (vatmetar).

b) Ferrarisovo mjerilo koristi se vrtložnim strujama za mjerenje energije izmjenične struje (električna brojila).

4. *Mjerenje električnog otpora*

Električni otpor R određuje se mjerenjem struje I i pada napona ΔU kroz otpor: $R = \Delta U/I$.



Električni otpor R može se mjeriti pomoću Wheatstoneovog mosta

$$R_x = R_0\,\frac{R_1}{R_2}$$

R_0 – poznati otpor, R_1/R_2 se izmjeri,
G – galvanometar (mora pokazivati 0).

5. *Elektronska mjerila*

Najpoznatija elektronska mjerila su:

a) Oscilograf je brzo pisalo linija za registriranje trenutnih vrijednosti veličina pri frekvencijama do nekoliko kHz.

b) Osciloskop (katodni osciloskop) je katodna cijev u kojoj se otklanjanjem elektronske zrake dobiva na zaslonu s fluorescentnim slojem dvodimenzionalni prikaz trenutnih vrijednosti mjerenih veličina. Kod prikazivanja periodičkih pojava uz vremenski pomak, usklađen s frekvencijom pojave, dobiva se njegova mirujuća slika.

c) Brojila impulsa su uređaji pomoću kojih se može prebrojiti broj periodičkih pojava (ako ih je moguće prikazati električnim impulsima). Upotrebljavaju se u prvom redu za mjerenje frekvencije. Točnost brojenja iznosi $10^{-7} \ldots 10^{-8}$.

OPTIKA I AKUSTIKA

Svjetlost

Vidljiva svjetlost je dio *elektromagnetskih valova* koji se – prema valnim dužinama λ – dijeli na:

kozmičke zrake	λ = 0,1 . . .	10 fm
gama zrake	λ = 10 . . .	1000 fm
rendgenske zrake	λ = 1 . . .	1000 pm
ultravioletno zračenje	λ = 1 . . .	390 nm
vidnu svijetlost	λ = 390 . . .	770 nm
infracrveno zračenje	λ = 0,77 . . .	1000 µm
mikrovalove (televizija)	λ = 1 . . .	1000 mm
radiovalove	λ = 1 . . .	10 000 m

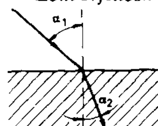
Osjetljivost na svjetlo oka (najveća = 1 pri λ = 555 nm) i raspoznavanje boja (koje se prelijevaju jedna u drugu):

λ nm	Boja	Relativna osjetljivost na svjetlost	λ nm	Boja	Relativna osjetljivost na svjetlost
400	violetna	0,0004	560	žuta	0,995
450		0,035	580	narandžasta	0,870
480	modra	0,139	600		0,631
500	modro-zelena	0,323	620	narandžasto-crvena	0,381
520	zelena	0,710	640	crvena	0,175
540		0,954	660		0,061
550	zeleno-žuta	0,995	700	tamno crvena	0,0041
555		1,000	750		0,00012

Brzina svjetlosti:

- u praznom prostoru (vakuumu) c_0 = 299 792 458 m/s
- u vodi $c = 224 \cdot 10^6$ m/s
- u staklu $c \approx (176 \ldots 195)\ 10^6$ m/s
- u dijamantu $c = 122 \cdot 10^6$ m/s

Lom svjetlosti



Indeks loma n je omjer sinusa upadnog kuta α_1 i kuta loma α_2 te je jednak omjeru brzina svjetlosti

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

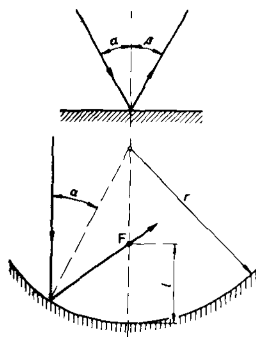
S obzirom na zrak iznosi indeks loma:

za vodu $n = 1,333$
za staklo $n \approx 1,520 \ldots 1,740$
za dijamant $n = 2,417$

Brzina valovnog gibanja c je umnožak frekvencije f i dužine vala λ

$$c = f\lambda$$

Refleksija



Pri refleksiji valova od ravne plohe je kut refleksije β jednak upadnom kutu α

$$\beta = \alpha$$

Na konkavnoj kuglinoj plohi s polumjerom r upadni se valovi reflektiraju kroz žarište (fokus) F, koje je udaljeno od tjemena plohe za razmak l

$$l = \frac{r}{2}\left(2 - \frac{1}{\cos \alpha}\right)$$

Pri malim upadnim kutovima α je

$$\cos \alpha \approx 1 \qquad l \approx r/2$$

Zvuk

Zvučni valovi dijele se po frekvenciji f na:

- infrazvuk $f < 16$ Hz
- čujni (fiziološki) zvuk $f = 16$ Hz . . . 20 kHz
- ultrazvuk $f > 20$ kHz

Brzina zvuka

Brzina zvuka u plinovima iznosi $c = \sqrt{\varkappa R T}$ (vidi str. 201).
Brzina zvuka u zraku iznosi 332 m/s pri 0 °C; 341 m/s pri 15 °C.
Brzina zvuka u kapljevinama i krutinama (pri 20 °C):

Tvar	c m/s	Tvar	c m/s
voda	1485	Al	5100
led (−4 °C)	3200	Cu	3800
drvo – meko	4500	Fe	5200
– tvrdo	3400	Hg	1430
pluto	500	Ni	4900
guma	50	Pb	1300
opeka	3600	Sn	2600
staklo	5000	Zn	3700

Osnovna frekvencija f titrajuće strune od materijala gustoće ϱ, prereza A, dužine l, a napete silom F, iznosi

$$f = 1/2l \cdot \sqrt{F/A\varrho}$$

Zvučni tlak

Efektivna vrijednost zvučnoga tlaka (pri $f = 1$ kHz):

granica čujnosti 0,00002 Pa

šapat	0,0002	Pa	klavir	0,2	Pa
razgovor	0,002	Pa	orgulje	2	Pa
glasan razgovor	0,02	Pa	sirena >	20	Pa

Jakost zvuka L određena je izrazom

$$L = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

gdje je p zvučni tlak, a p_0 zvučni tlak na granici čujnosti ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa). Je ˙˙ za jakost zvuka je 1 d e c i b e l (dB).

Jakost zvuka L u raznim okolnostima:

Šum, buka	L dB	Dozvoljena granica buke u prostorijama	L dB
šapat	10 . . . 30	koncertna dvorana	30
razgovor	40 . . . 50	bolesnička soba	30 . . . 35
glasan govor	70	čitaonica	35
vika	80	učionica	40
automobilska sirena	90	studijska soba	40
pneumatski bat	100	soba za sjednice	50 . . . 60
zakivanje kotlova	110	kongresna dvorana	55
reaktivni avion	120	ured (sa strojevima)	70 . . . 75
granica bola	130		

Tonska skala

O k t a v a je područje tonova od početne frekvencije f do konačne frekvencije $2f$. Stupnjevanje frekvencije tonova u oktavi po 12-stupanjskoj skali (stupnjem $2^{1/12} = 1{,}059463$):

Ton	c	cis des	d	dis es	e	f	fis ges	g	gis as	a	ais b	h	c
Stupanj	1,00	1,06	1,12	1,19	1,26	1,33	1,41	1,50	1,59	1,68	1,78	1,89	2,00

Ishodište tonske skale je oktava na granici čujnoga zvuka frekvencije tona c: $f_c = 16{,}35$ Hz. Frekvencije f_a tonova a u n-toj oktavi su $2^n f$:

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
f_a	27,5	55	110	220	**440**	880	1760	3520	7040 Hz

UPRAVLJANJE – REGULACIJA – AUTOMATIZACIJA

Regulacijska tehnika obrađuje odnose među uzrokom i posljedicom u tehničkim sistemima. Njen je zadatak utjecanje na ulazne veličine na taj način, da se dobiju željene izlazne veličine.

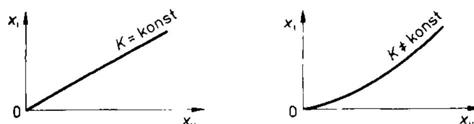
REGULACIJSKI ČLANOVI

Regulacijski članovi su prelazni članovi regulacijskog sistema u kojima se dobivaju iz danih ulaznih veličina x_v određene izlazne veličine x_i.

Statička karakteristika regulacijskog člana

U svakom su regulacijskom članu ulazna i izlazna veličina međusobno ovisne: $x_i = f(x_v)$ $\qquad x_i = K\,x_v$

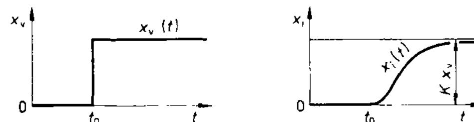
Koeficijent (statičkog) pojačanja $K = x_i/x_v$ je odnos izlazne i ulazne veličine u stacionarnom stanju, a može biti linearan (K = konst) ili nelinearan ($K \neq$ konst):



U regulacijskoj tehnici obrađuju se linearni odnosi. Nelinearni odnosi traže posebne postupke, a u užim se područjima često uzimaju približno linearnima.

Dinamička karakteristika regulacijskog člana

Promjene ulaznih i izlaznih veličina vazda su ovisne o vremenu t.



Ovisnost izlazne veličine od ulazne nazivamo *vremenski odziv*

$$x_i(t) = f[x_v(t)]$$

Vremenski je odziv za pojedinu vrstu regulacijskog člana karakterističan. U većini slučajeva izražen je diferencijalnom jednadžbom koju jednostavnije rješavamo u obliku prenosne funkcije P.

Prenosna funkcija P je odnos među vremenski promjenljivom izlaznom i ulaznom veličinom. Proračunava se pomoću Laplaceove transformacije

$$P(s) = \frac{X_i(s)}{X_v(s)} = \int_0^\infty e^{-st} x_i(t)\,dt \Big/ \int_0^\infty e^{-st} x_v(t)\,dt$$

gdje je s Laplaceova varijabla. Laplaceovom transformacijom prikazane veličine označuju se velikim slovima.

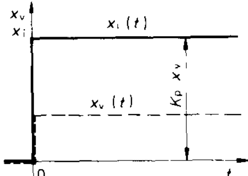
Prenosna se funkcija P postupno približava koeficijentu pojačanja K.

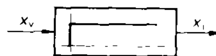
Vremenski odzivi

Vremenski odzivi prikazuju vremenski tok izlazne veličine u ovisnosti o nekom vremenskom toku ulazne veličine.

Vremenske odzive kod kojih je vremenski tok ulazne veličine udarna funkcija (»step«-funkcija) (kao funkcija $x_v(t)$ na str. 201) nazivamo *prelaznim funkcijama*. Njihovi su najznačajniji primjeri:

1. *Proporcionalni član* (P)

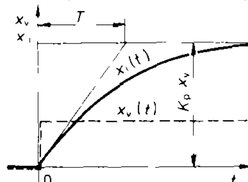


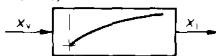


$x_i = K_P x_v$

Primjeri: poluga, tlak i protok kapljevine u cijevima

2. *Proporcionalni član s usporenjem* – 1. stupnja (PT_1)



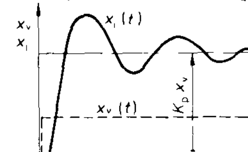


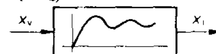
$$T \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_P x_v$$

$$x_i = K_P x_v \left(1 - e^{-t/T}\right)$$

Primjeri: temperaturno rastezanje, tlak i protok plina u plinskim cijevnim sistemima

3. *Proporcionalni član s usporenjem* – 2. stupnja (PT_2)





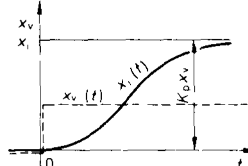
$$T_p^2 \frac{d^2x_i}{dt^2} + 2\,d\,T_p \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_P x_v$$

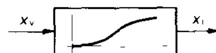
T_p – neprigušeno titrajno vrijeme

d – faktor prigušivanja (npr. $d_{opt} \approx 0{,}7$)

Primjer: pneumatski bat s povratnom oprugom

4. *Proporcionalni član s usporenjem* – višeg stupnja (PT_n)

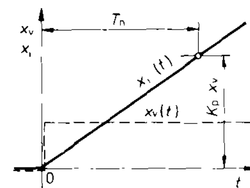


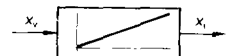


$$T_n^n x_i^{(n)} + \ldots T_1 \dot{x}_i + x_i = K_P x_v$$

Primjer: regulacija temperature

5. *Integralni član* (I)



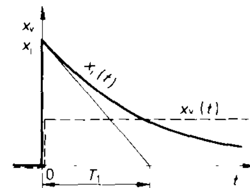


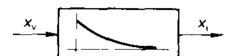
$$x_i = K_I \int x_v dt$$

$$K_I = K_P/T_n$$

Primjer: razina kapljevine u posudi

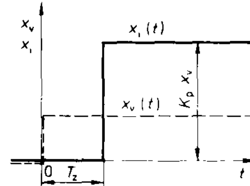
6. *Derivabilni član s usporenjem* (DT_1)

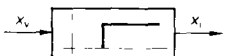




$$T_1 \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_P T_D \frac{dx_v}{dt}$$

7. *Član s mrtvim vremenom bez usporenja*





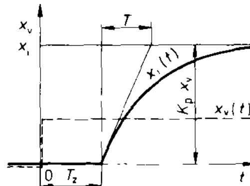
$t < T_z \qquad x_i = 0$

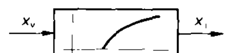
$t > T_z \qquad x_i = K_P x_v$

T_z – mrtvo vrijeme

Primjer: transportna traka

8. *Član s mrtvim vremenom i usporenjem*



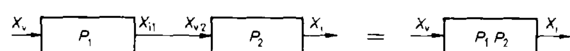


Primjer: miješanje u posudi, zagrijavanje

Spajanje regulacijskih članova

Spoj članova u regulacijskim sistemima najlakše se prikazuju prenosnim funkcijama regulacijskih članova(P), koje su omjer, po Laplaceu transformiranih, izlaznih signala $x_i(s)$ i ulaznih signala $x_v(s)$.

1. *Serijski spoj*

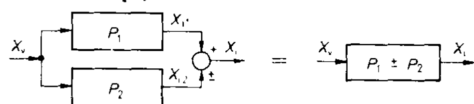


$X_{i1} = X_{v2}$

$X_{i1} = P_1X_v \quad X_i = P_2X_{v2} \qquad X_i = PX_v$

$X_i = P_1P_2X_v \qquad P = P_1P_2$

2. *Paralelni spoj*

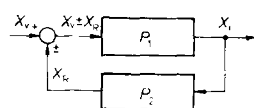


$X_i = X_{i1} \pm X_{i2}$

$X_{i1} = P_1X_v \quad X_{i2} = P_2X_v \qquad X_i = PX_v$

$X_i = (P_1 \pm P_2)X_v \qquad P = P_1 \pm P_2$

3. *Povratna veza* – osnovni spoj regulacijskih petlji



Na slici: + faznost
– protufaznost

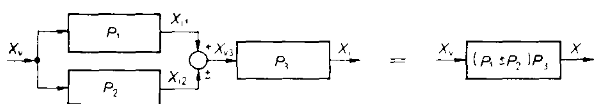
$$X_i = \frac{P_1}{1 \mp P_1P_2} X_v$$

$X_i = P_1 (X_v \pm X_R)$

$X_R = P_2X_i$

U jednadžbi: – faznost
+ protufaznost

4. *Sastavljeni paralelno-serijski spoj*

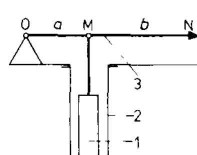


$X_{v3} = X_{i1} \pm X_{i2}$

$X_{i1} = P_1X_v \quad X_{i2} = P_2X_v \qquad X_i = P_3X_{v3}$

$X_{v3} = (P_1 \pm P_2)X_v \qquad X_i = (P_1 \pm P_2)P_3X_v$

Primjer: mjerni davač temperature



1 – rastezni štap
duljina l_1
temperaturna rastezljivost α_1

2 – plašt
duljina l_2
temperaturna rastezljivost α_2

3 – poluga
krakovi *a*, *b*

Promjena temperature		$\Delta T = X_v$
Temperaturno rastezanje	– rasteznog štapa	$\Delta l_1 = X_{i1}$
	– plašta (2)	$\Delta l_2 = X_{i2}$
Pomak poluge (3)	– u točki M	$\Delta l_1 - \Delta l_2 = X_{i1} - X_{i2} = X_{v3}$
	– u točki N	$\Delta s = X_i$

Prenosne funkcije

$P_1 = X_{i1}/X_v = \Delta l_1/\Delta T = l_1\alpha_1$

$P_2 = X_{i2}/X_v = \Delta l_2/\Delta T = l_2\alpha_2$

$P_3 = X_i/X_{v3} = \Delta s/(\Delta l_1 - \Delta l_2) = (a + b)/a$

Pomak poluge u točki N – prikaz promjene temperature

$$\Delta s = X_i = (P_1 - P_2)P_3X_v = (l_1\alpha_1 - l_2\alpha_2)\frac{a + b}{a} \cdot \Delta T$$

Zamjećivanje veličina

Veličine i njihove vrijednosti zamjećujemo *osjetnicima* (senzorima) koji djeluju neposredno, a to su:

– *ticala* (za duljine i neke druge veličine)
– *mjerni davači* (za većinu veličina).

Regulacione veličine su većinom samo posredno mjerljive (npr. temperatura iz temperaturnog rastezanja; brzina vrtnje iz centrifugalne sile itd.). Odgovarajući mjerni davači djeluju na raznim principima: mehaničkom, toplinskom, kontaknom, kapacitivnom, induktivnom itd.

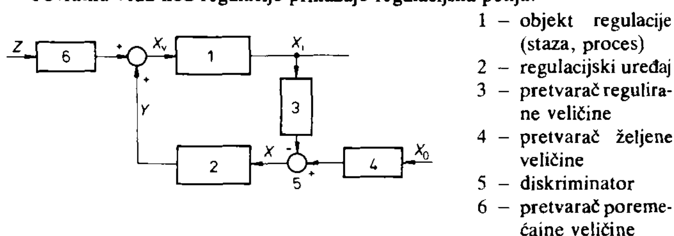
Podaci se dobivaju posredno preračunavanjem iz odgovarajućih izmjerenih veličina (npr. duljinu puta određujemo iz izmjerenog vremena i brzine; učin iz izmjerenog izvršenog rada i utrošenog vremena; specifični toplinski kapacitet iz izmjerene topline i temperaturne razlike itd.).

Za daljnju obradu su naročito podesni signali slijedećih veličina: puta, vremena, sile, tlaka, protoka, električnog napona, električne struje, frekvencije i sl.

Mjerenje mora biti veoma točno, jer regulatori obrađuju vrlo mala odstupanja veličina, tj. razlike između stvarne i željene (poredbene, referentne) veličine.

Regulacijska petlja

Povratnu vezu kod regulacije prikazuje regulacijska petlja.



1 – objekt regulacije (staza, proces)
2 – regulacijski uređaj
3 – pretvarač regulirane veličine
4 – pretvarač željene veličine
5 – diskriminator
6 – pretvarač poremećajne veličine

Regulirana veličina je izlazna veličina objekta regulacije X_i.
Željena veličina je X_0.

Regulirana i željena veličina sistema mogu biti fizikalno i dimenzijski različite. Da bi se omogućila međusobna komparacija, moraju se signali osjetnika promijeniti u jedinstveni – obično električni – oblik, a to se postiže *pretvaračima.*

U *diskriminatoru* se mora signal regulirane veličine X_i komparirati promijenjenom željenom veličinom X_0. Njihova je razlika *regulacijsko odstupanje*

$$X = P_4 X_0 - P_3 X_i$$

Regulacijsko odstupanje X je ulazna veličina regulatora; on ga pretvara u izlaznu veličinu Y, a to je *izvršna naredba*

$$Y = P_R X$$

pričem je P_R prelazna funkcija regulacijskog uređaja.

Na sve članove regulacijske petlje mogu uticati vanjski uplivi, a uzimaju se u obzir kao *smetnja (poremećajne veličina) Z.*

Izvršna naredba Y i smetnje Z daju ulaznu veličinu objekta regulacije X_v

$$X_v = Y + P_6 Z$$

U objektu regulacije se ulazna veličina X_v pretvara u izlaznu veličinu X_i

$$X_i = P_0 X_v$$

gdje je P_0 prelazna funkcija objekta regulacije. Karakteristične veličine objekta regulacije mogu se u većini slučajeva odrediti jedino ispitivanjem.

Regulirana veličina X_i mora postići ili održavati određenu vrijednost željene veličine X_0, a ta može biti:
- konstantna,
- da se nakon određenog vremena promijeni,
- da slijedi određenu promjenu. (npr. puta ili kuta i sl.)

Pri upravljanju i regulaciji, koje su (općenito) postupak kojim utičemo na ulaznu veličinu X_v na taj način, da imaju izlazne veličine X_i željene vrijednosti, razlikujemo – s obzirom na povratnu vezu:

1. upravljanje nema povratne veze (npr. upravljanje stroja za pranje koje je programom unapred obrađeno);

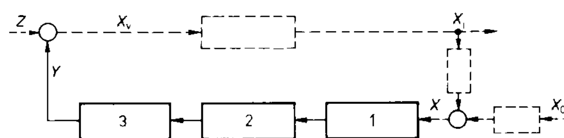
2. regulaciju koja ima povratnu vezu, pričem izlazna veličina može biti:
- vremenski nepromjenljiva (npr. alatni stroj koji radi po modelu – šabloni),
- vremenski ustaljena (npr. regulacija stalne brzine vrtnje turbine).

Automatizacija je združivanje niza regulacijskih postupaka s automatskim djelovanjem, tako da pri određenoj uzlaznoj veličini dobivamo željenu izlaznu veličinu nekog postupka, koja je opet ulazna veličina slijedećeg postupka.

Regulacijski uređaj

Osim zamjećivanja i mjerenja stvarne vrijednosti regulirane vličine (tj. izlazne veličine iz regulacijskog objekta) X_i, određivanja vrijednosti željene veličine X_0, pretvaranje regulirane i željene veličine u fizikalno i dimenzijski jednaku veličinu, određivanje regulacijskog odstupanja X s komparacijom regulirane i željenje veličine, regulacijski uređaj mora obavljati, u najmanju ruku, još i slijedeće funkcije:

1. popravak regulacijskog odstupanja X odgovarajućim *regulatorom,*
2. pojačanje signala – posebno pri regulaciji koja traži velike sile i brzine – *pojačalom*, pričem je pomoćna energija električna, hidraulička ili pneumatska,
3. namještanje vrijednosti izvršne naredbe Y *postavnim članom*.



1 – regulator, 2 – pojačalo, 3 – postavni član

Granične regulacijske naprave sprečavaju – kao sigurnosni uređaj – premašivanje donje i gornje granične vrijednosti regulirane veličine.

Oznake za način djelovanja regulacijske naprave su (po DIN 2481):

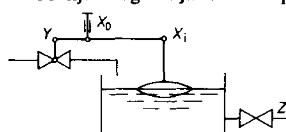
⊕ – otvaranje pri porastu regulirane veličine
⊖ – otvaranje pri padu regulirane veličine
⊕ – otvaranje pri dosegu gornje granične vrijednosti
⊖ – otvaranje pri dosegu donje granične vrijednosti
⊕ – zatvaranje pri dosegu gornje granične vrijednosti
⊖ – zatvaranje pri dosegu donje granične vrijednosti

Regulatori

Regulatori su dijelovi regulacijskih naprava koji prerađuju signale regulacijskih odstupanja X kao svoje ulazne veličine.

Regulatori bez pomoćne energije su jeftine naprave, prikladne pri malim izvršnim silama i brzinama. Kod njih utječe regulacijsko odstupanje neposredno na izvršnu naredbu.

Primjer: regulacija razine kapljevine



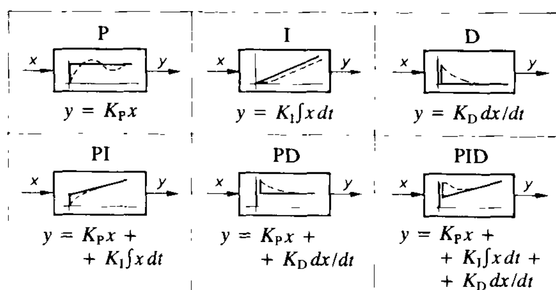
X_0 – udešavanje razine (željena veličina)
X – pad razine (regulacijsko odstupanje)
Y – zaporni ventil (izvršna naredba)
Z – otjecanje (poremećajna veličina)

Regulatori s pomoćnom energijom (električnom, hidrauličkom, pneumatskom) djeluju kontinuirano ili diskontinuirano.

Regulatori s kontinuiranim djelovanjem

Kod njih je izlazna veličina Y ovisna o ulaznoj veličini X. Za takve regulatore vrijede zakonitosti regulacijskih članova.

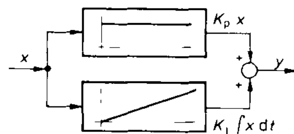
Vrste kontinuirano djelujućih regulatora:



Prelazna funkcija: idealnih regulatora ——
realnih regulatora – – –

Navedene diferencijalne jednadžbe vrijede za idealne regulatore.

Primjer spoja – regulator PI:

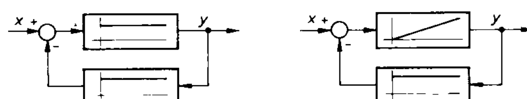


Povratne vezi regulatora

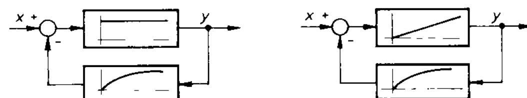
Proizvoljno vremensko ponašanje gotovo svih vrsta regulatora postizava se prikladnom povratnom vezom. Na rad regulatora utječe vrsta regulacijskog člana u povratnoj vezi, a to su:

- čvrsta povratna veza: s regulacijskim članom P,
- povratna veza s pojačanjem: s regulacijskim članom PT_1,
- povratna veza sa slabljenjem (derivaciona): s regulacijskim članom D,
- povratna veza s pojačanjem i slabljenjem: s regulacijskim članovima PT_1 i D u serijskom spoju.

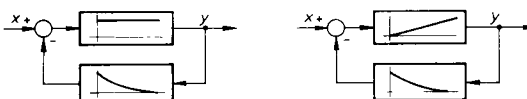
Čvrsta povratna veza



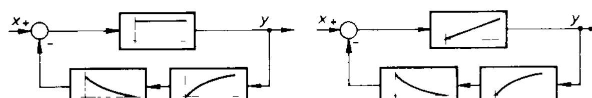
Povratna veza s pojačanjem



Povratna veza sa slabljenjem



Povratna veza s pojačanjem i slabljenjem



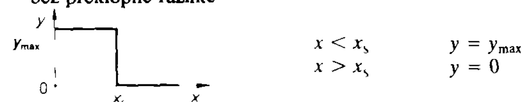
Na sličan se način mogu stvarati najrazličitije kombinacije regulacijskih članova u regulatorima.

Diskontinuirano djelujući regulatori

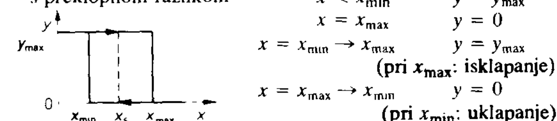
Kod tih regulatora nema kontinuirane ovisnosti među izlaznom i ulaznom veličinom, već je moguć samo ograničen broj izlaznih veličina koje odgovaraju ulaznim veličinama.

Primjer: relejni regulator (npr. bimetalni)

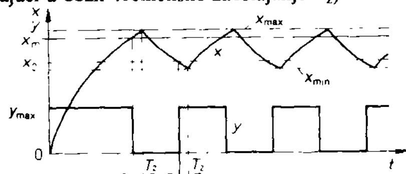
– bez preklopne razlike



– s preklopnom razlikom



Vremensko ponašanje diskontinuirano djelujućih regulatora s preklopnom razlikom (uzimajući u obzir vremensko zaostajanje T_z)



Izvršna naredba y izaziva pri vrijednosti y_{max} porast regulirane veličine x. Čim ona dosegne vrijednost x_m, izvršna se naredba isključuje do vrijednosti 0; regulirana veličina x raste – uz vremensko zaostajanje T_z – dalje do vrijednosti x_{max}, a tek tada počinje opadati. Pri vrijednosti x_0 izvršna se naredba ponovno uklapa do vrijednosti y_{max}, regulirana veličina x i dalje opada te počinje rasti tek nakon vremenskog zaostajanja T_z.

Područja primjene nekih regulacijskih naprava

Veličina	Vrsta regulatora P	I	PI	PID
temperatura	+	−	+	+
tlak	−	+		
protok	−		+	
razina kapljevine	−	−	+	
brzina vrtnje	+	+	++	++
električni napon	+			

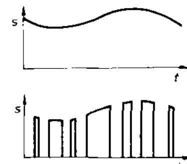
* Znakom »+« označeno je prikladno, a znakom »−« neprikladno područje primjene.

ELEKTRONIČKA OBRADA PODATAKA

Informacija je vijest o zbivanjima u okolišu promatranog sustava i u sustavu samom. Vijesti primamo u obliku *podataka* o mjerenjima pojedinih veličina, vezanih na zbivanja, dakle o mjerenjima njihovih vrijednosti i promjena, a u obliku prikladnom za obradu. Stoga podaci sadrže u prvom redu brojčane vrijednosti zbivanja, procesa i tokova. U tu su svrhu označeni znakovima (brojkama, slovima ili posebnim znakovima) ili funkcijama kao matematičkim propisima o vrijednostima.

Informatika je grana znanosti i tehnike koja obuhvaća metode i postupke obrade podataka (dobivenih u prvom redu automatski).

Prenos podataka označujemo kao *signal*, koji je nosilac informacija. Signali su kontinuirani ili diskretni:



- *kontinuirani signali* teku vremenski neprekidno – u skladu s vremenskim tokom veličine o kojoj donose podatke;
- *diskretni signali* nižu se vremenski prekidno (pojedinačno) i množinom impulsa daju podatke o opažanoj veličini.

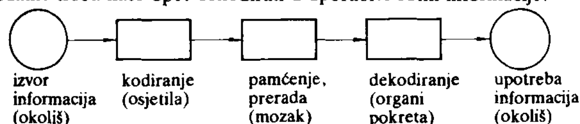
Za signale se većinom upotrebljava električna struja i napon (ali i put, tlak, toplina, svjetlost itd.). Podaci se prikazuju u ovisnosti o njihovim vremenskim promjenama $I(t)$ i $U(t)$.

Prerada podataka je proces pri kojem se iz ulaznih podataka po određenom preradbenom propisu dobivaju izlazni podaci.

Prosti oblik signala je harmonijsko titranje (opisano kružnom frekvencijom i amplitudom).

Podatke obrađujemo elektroničkim računarima koji mogu biti analogni, digitalni ili hibridni. Potonji se sastoje od analognih i digitalnih sastavnih dijelova.

Elektronički računari mogu prerađivati samo one signale podataka koji su izraženi u prikladnom obliku, tj. u prikladnom *kodu*. Stoga valja signale najprije kodirati. Kodirane podatke možemo spremiti (u memorijama). Obrađene podatke treba nato opet dekodirati u uporabivi oblik informacije.



Tehnika automatizacije bavi se oblikovanjem automatski reguliranih procesa u fizikalno-tehničkim sistemima. To postiže u prvom redu računarskom tehnikom. U velikom opsegu upotrebljava također opće priznate metode i način opažnja, karakterističan za kibernetiku (koju je – po općem priznanju – započeo i utemeljio N. Wiener, 1894–1964).

Princip analogne tehnike

Analognim računarima, nazvanim po analognom načelu djelovanja, prikazuju se kontinuirano dva različita fizikalna sustava veličina jednakim matematskim odnosima. Takva je npr. sličnost među mehaničkim i električnim titrajnim sistemom:

mehaničko titranje $m\ddot{y} + D\dot{y} + ky = F(t)$
električno titranje $L\ddot{q} + R\dot{q} + 1/C \cdot q = U(t)$

Primjeri analognih veličina:

Količine		Protoci		
put	s	brzina	v	$= ds/dt$
kut (analit.)	$\hat{\alpha}$	kutna brzina	ω	$= d\hat{\alpha}/dt$
volumen	V	volumenski protok	q_V	$= dV/dt$
masa	m	maseni protok	q_m	$= dm/dt$
toplina	Q	toplinski tok	Φ	$= dQ/dt$
el. naboj	Q_{el}	el. struja	I	$= dQ_{el}/dt$
Potencijalne razlike		**Otpori**		
sila	F	konstanta prigušivanja	d	$= F/v$
okret. moment	T, M		d_r	$= M/\omega$
tlačna razlika	Δp	protočni otpor	η_V	$= \Delta p/q_V$
temper. razlika	ΔT	toplinski otpor	$1/K$	$= \Delta T/\Phi$
el. napon	U	el. otpor	R	$= U/I$
Kapaciteti		**Tromosti**		
konstanta opruge	$c = F/s$	masa	m	$= \frac{F}{dv/dt}$
	$c_r = M/\hat{\alpha}$	moment tromosti	J	$= \frac{M}{d\omega/dt}$
el. kapacitet	$1/C = U/Q_{el}$	el. induktivitet	L	$= \frac{U}{dI/dt}$

Analogni računari služe u prvom redu za simulaciju tehničnih problema.

Bit programiranja analognog računara sastoji se u postavljanju analognog fizikalnog modela kojega treba preoblikovati u matematički model te ga pretvoriti u radni sistem računara.

Za rješavanje posebnih i zapletenih zadataka moraju biti pojedini sastavni dijelovi analognog računara međusobno vezani odgovarajućim redom – analogno fizikalnom procesu.

Analogni računari djeluju kontinuirano (pa se i računane veličine mogu kontinuirano mijenjati). Njihovo je djelovanje brzo pa se stoga mnogo upotrebljavaju u tehnici regulacije.

*

Najjednostavniji analogni računar je opće poznati logaritamski računar pri kojem brojeve množimo i dijelimo zbrajanjem i odbijanjem njihovih logaritama (predočenih dužinama).

Princip digitalne tehnike

U digitalnom su računaru informacije prikazane konačnim nizom brojki (*digitus*) kojima zapisujemo brojeve.

U broju ima svaka brojka svoju vlastitu i svoju mjesnu vrijednost s obzirom na izabrani brojčani sustav. Općenito vrijedi za svaki broj X:

$$X = \sum_{i=m}^{-n} N_i B^i$$

gdje je B – osnova brojčanog sustava, N – brojka u sustavu.

Primjeri:

– *Decimalni sustav*
$B = 10, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$
$X = 1987_{10} = 1 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$

– *Binarni (dualni) sustav*
$B = 2, \quad N = 0, 1$
$X = 10110{,}1_2 = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} = 22{,}5_{10}$

– *Oktalni sustav*
$B = 8, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$
$X = 120{,}4_8 = 1 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8^1 + 0 \cdot 8^0 + 4 \cdot 8^{-1} = 80{,}5_{10}$

– *Heksadecimalni sustav*
$B = 16, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$, A (10), B (11), C (12), D (13), E (14), F (15)
$X = 20C4_{16} = 2 \cdot 16^3 + 0 \cdot 16^2 + C \cdot 16^1 + 4 \cdot 16^0 = 8388_{10}$

U općoj je upotrebi decimalni sustav. Kod digitalnih računara je naročito prikladan binarni sustav, jer tehnički potpuno odgovara dvjema stanjima s oznakama:

0 – »prolaz otvoren«
1 – »prolaz zatvoren«.

Svako od tih dvaju stanja znači 1 *bit* (*binary digit*).

Oktalni i heksadecimalni sustav su namijenjeni lakšoj predodžbi brojeva.

4-bitni binarni zapis (kod) decimalnih brojki 0 . . . 9:

Brojka	Zapis	Brojka	Zapis	Brojka	Zapis
0	0000	4	0100	8	1000
1	0001	5	0101	9	1001
2	0010	6	0110		
3	0011	7	0111		

Primjer zapisa broja 1988: 0001 1001 1000 2000

Matematske operacije tako zapisanih brojeva uređuje program računara.

Sadanji digitalni računari mogu obaviti više od 10^7 operacija u sekundi.

Preradu prvenstveno brojčanih podataka upotrebljavamo pri regulaciji računarom (*NC – numeric control*).

Kodiranje digitalnih podataka

Digitalni računari prerađuju digitalne podatke, tj. takve podatke koje možemo označiti samim znakovima. Znakovi proizlaze iz dogovorne skupine znakova, a raspoređeni su u znakovnim nizovima, npr.:

niz decimalnih brojki (cifara)	0, 1, 2, . . .
niz velikih latiničnih slova	A, B, C, . . .
niz malih latiničnih slova	a, b, c, . . .
niz posebnih znakova	!, ", #, . . .

Tako razlikujemo:

– *brojčane (numeričke) podatke* koji se sastoje iz brojki;

– *slovno-brojčane (alfanumeričke) podatke* koji se sastoje iz slova, brojki i posebnih znakova.

Osim ovih znakova postoje i *regulacijski znakovi* (NUL, . . . DEL).

Znakovi za (ISO-) 7-bitne kode (JUS I.B1.002 – 1982) sastavljeni su iz bitova $b_7 \dots b_1$:

b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	redak Y	stupac X 0	1	2	3	4	5	6	7
→								0	0	0	0	1	1	1	1
	→							0	0	1	1	0	0	1	1
		→						0	1	0	1	0	1	0	1
			0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	Ž	P	ž	p
			0	0	0	1	1	SOH	DC_1	!	1	A	Q	a	q
			0	0	1	0	2	STX	DC_2	"	2	B	R	b	r
			0	0	1	1	3	ETX	DC_3	#	3	C	S	c	s
			0	1	0	0	4	EOT	DC_4	$	4	D	T	d	t
			0	1	0	1	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
			0	1	1	0	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
			0	1	1	1	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
			1	0	0	0	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
			1	0	0	1	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
			1	0	1	0	10	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
			1	0	1	1	11	VT	ESC	+	;	K	Š	k	š
			1	1	0	0	12	FF	FS	,	<	L	Đ	l	đ
			1	1	0	1	13	CR	GS	–	=	M	Ć	m	ć
			1	1	1	0	14	SO	RS		>	N	Č	n	č
			1	1	1	1	15	SI	US	/	?	O	–	o	DEL

U 7-bitnom binarnom zapisu je znak »K« određen nizom bitova: 100 1011, podatak »Srijeda 19.30« zapisom: 101 0011 111 0010 110 0101 110 0100 110 0001 010 0000 011 0001 011 1001 010 1110 011 0011 011 0000

Znakovi upravljanja u 7-bitnom kodu znače:

ACK	– ACKNOWLEDGE	– potvrda ispravnog primitka
BEL	– BELL	– znak alarma
BS	– BACKSPACE	– pomakni natrag
CAN	– CANCEL	– poništiti
CR	– CARRIAGE RETURN	– pomak nosača natrag
DC	– DEVICE CONTROL	– znaci za kontrolu uređaja
DEL	– DELETE	– izostaviti
DLE	– DATA LINK ESCAPE	– slijedi znak posebnog značenja
EM	– END OF MEDIUM	– kraj medija
ENQ	– ENQUIRY	– upit
EOT	– END OF TRANSMISSION	– svršetak prenosa
ESC	– ESCAPE	– prelaz
ETB	– END OF TRANSMISSION BLOCK	– svršetak prenosa bloka
ETX	– END OF TEXT	– svršetak teksta
FF	– FORMAT FEED	– određivanje pozicije
FS	– FILE SEPARATOR	– znak za odvajanje datoteka
GS	– GROUP SEPARATOR	– znak za odvajanje blokova
HT	– HORIZONTAL TABULATION	– horizontalno tabuliranje
LF	– LINE FEED	– određivanje pozicije na slijedeću liniju
NAK	– NEGATIVE ACKNOWLEDGE	– potvrda neispravnog primitka
NUL	– NULL	– prazan znak
RS	– RECORD SEPARATOR	– znak za odvajanje slogova
SI	– SHIFT-IN	– povratak na standardno značenje
SO	– SHIFT-OUT	– nailazak znakova s promijenjenim značenjem
SOH	– START OF HEADING	– početak zaglavlja
SP	– SPACE	– razmak
STX	– START OF TEXT	– početak teksta
SUB	– SUBSTITUTE CHARACTER	– zamijeniti
SYN	– SYNCHRONOUS IDLE	– znak za sinkronizaciju
US	– UNIT SEPARATOR	– znak za odvajanje polja
VT	– VERTICAL TABULATION	– vertikalno tabeliranje

Logičko zaključivanje

Booleova logička algebra služi se skupom od dva elementa: 0 (krivo) i 1 (pravilno).

Elementarne funkcije Booleove algebre

Funkcija	Simbol	Funkcija	Simbol	Funkcija	Simbol
NE (NO)	–			implikacija	$\supset$
ILI (OR)	$\vee$	NE-ILI (NOR)	$\bar{\vee}$	ekvivalencija	$\equiv$
I (AND)	$\wedge$	NE-I (NAND)	$\bar{\wedge}$	antivalencija	$\not\equiv$

Pomoću elementarnih funkcija Booleove algebre možemo u načelu prikazati svaku logičku kombinaciju.

Booleove funkcije

a	b	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$a \vee b$	$a \wedge b$	$a \bar{\vee} b$	$a \bar{\wedge} b$	$a \supset b$	$a \equiv b$	$a \not\equiv b$
0	0			0	0	1	1	1	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
1	1			1	1	0	0	1	1	0

Pohranjivanje podataka

Kodirane podatke možemo pohraniti u memorijama i to za stalno (za što su prikladne bušene kartice i trake) ili s mogućnošću mijenjenja (što omogućuju magnetske memorije).

Bušene kartice i trake upotrebljavaju se za jednokratnu snimku podataka. Na nje bušenjem zapisujemo dva stanja: 0 – nebušeno i 1 – bušeno.

Bušena kartica (od kartona bez električki vodljivih dijelova, veličine 187,32 × 82,55 mm) obično je podijeljena: po visini na 10 normalnih redaka (0 ... 9) i na dva dodatna retka; po duljini pa npr. na 45, 80 ili 90 stupaca. Svaki stupac pripada jednom kodiranom znaku, a svaki redak u stupcu jednom bitu (0 ili 1).

Bušene trake su na veliku duljinu razvučene kartice sa stupcima u razmaku po 2,5 mm i recima, razvučenima u nizove, a njihov broj mora odgovarati upotrebljenom kodu. Na presjecištima stupaca i redaka su mjesta za rupice. Između redaka je niz manjih rupica za transport trake.

Magnetske memorije iskorišćuju magnetska svojstva vrlo tankih (≈ 11 μm) feromagnetskih slojeva (NiFe, NiCo itd.), nanesenih na nosivu podlogu. Te slojeve možemo lokalno (točkasto) magnetizirati i to u dva suprotna magnetska stanja, što odgovara – nalik na bušenje – stanjima 0 i 1.

Magnetske memorije razlikujemo po nosivoj podlozi:

- Magnetske kartice su od plastične umjetne tvari, veličine npr. 80 × 350 mm.
- Magnetske trake su također od plastičnih umjetnih tvari (debljine ≈ 50 μm), mnogo su uže od kartica (npr. 3 ... 12 mm), ali znatno dulje (npr. 750 m). Brzina odvijanja je npr. 1,7 m/s.
- Magnetski bubnjevi su od slitina lakih kovina (promjera 500 ... 1000 mm), sadrže i do 10^7 znakova. Njihova prenosna brzina iznosi 10^6 bit/s.
- Magnetski koluti (diskovi) (promjera 500 ... 1500 mm) iskorištavaju za smještaj znakova obje strane i stoga zauzimaju – uz isti kapacitet – znatno manji prostor od bubnjeva. Obično je 6 ... 12 koluta skupljeno u izmjenjivi kolutni slog. Mali magnetski koluti (diskete) (promjera 80 ... 250 mm) imaju kapacitet do 1,6 · x 10^6 bit/s.

Druge izvedbe magnetskih memorija su:

- Keramičke ploče s magnetskim slojem (NiFe) koji je u vakuumu parom nanesen u debljini od samo (2 ... 20) · 10^{-2} μm.
- Magnetske obručne jezgre, prešane od feromagnetskog materijala (u obruče pravokutnog presjeka). Strujnim udarom preklapaju se iz jednog u drugi magnetski smjer.

U magnetskim mamorijama spremljeni podaci mogu se – po potrebi – brisati odnosno zamjenjivati.

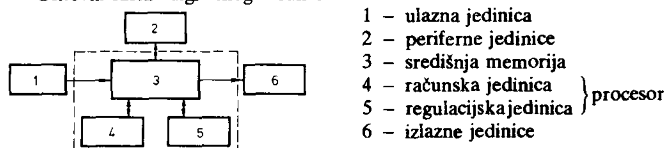
Aparaturna oprema

Aparaturnu opremu čine električni (elektronički) i mehanički sklopovi. Pri obradi podataka u njima se redaju određene operacije serijski.

Podatke i naredbe predstavljaju u digitalnim računarima binarni znakovi koji su obično združeni u riječima stalne duljine (4, 6, 8 = 1 bajt (byte), 12, 16, 32, 48, 60, 64 i više bitova). Podaci i naredbe prerađuju se u pojedinim jedinicama računara u elektroničkim spojevima koji su sastavljeni od logičkih (poluprovodičkih) elemenata, funkcionalno vezanih (u velikoj gustoći) na malim pločicama – *čipovima (chip)*. Broj u čipu združenih elemenata označuje se »integracijskim brojem«.

Broj elemenata	Vezivanje			
10...100	SSI	*(Small Scale Integration)*	rijetka	gustoća
50...500	MSI	*(Medium Scale Integration)*	osrednja	
> 1000	LSI	*(Large Scale Integration)*	velika	
> 10000	VLSI	*(Very Large Scale Integration)*	vrlo velika	

Osnovni sastav digitalnog računara



Ulazna jedinica prima podatke i naredbe korisnika (čitač, tastatura . . .).

Periferne jedinice obuhvataju procesne jedinice (procesnu periferiju, periferne memorijske jedinice: memorijske kartice, trake, kolute, bubnjeve).

Središnja memorija sprema informacije-podatke i naredbe. Karakterističan je za nju kapacitet za spremanje informacija (jedinica kapaciteta središnje memorije je 1 kilobajt = 2^{10} = 1024 riječi) te brzina za njihovo unošenje i crpljenje.

Računska jedinica obavlja sve zahtijevane operacije:

- aritmetičke operacije (zbrajanje, odbijanje, množenje, dijeljenje),
- logične operacije – uspoređivanje (>, ≧, =, ≦, <, ≠) i odlučivanje,
- organizacijske operacije (prenos podataka i naredbi među funkcijskim jedinicama računara).

Regulacijska jedinica dirigira izvođenje naredbi po programu. Računska i regulacijska jedinica zajedno sačinjavaju *procesor*.

Izlazne jedinice (štampač, »plotter«, ekran . . .) predavaju korisniku rezultate računara.

Digitalni računari upotrebljavaju se za rješavanje svih zadataka koji se mogu oblikovati u programima.

Programska oprema

Digitalni računar je automat u kojem teku informacijski procesi po točno određenim uputama.

Program je potpuni niz uputa za rješavanje danog zadatka. Te upute sadrže računske naredbe za aritmetičke operacije, usporedbene naredbe za logičke operacije itd.

Programi za korijene i eksponente, trigonometrijske i druge funkcije koje se javljaju u praksi veoma često, mogu se – posebno izrađeni – spremati i po potrebi uključiti u drugi program kao potprogram.

Izrada programa ovisna je o strukturi i izvedbi elektroničke naprave za preradu podataka (računala).

Algoritam je temelj programa te je takav popis svih uputa kojima se omogućuje rješenje određenog zadatka po koracima. U njem su pojedini koraci određeni tako, da ih računar može »razumjeti« i izvesti, tj.:

- svaki algoritam sastoji se iz više pojedinih koraka, a svaki korak iz računskih propisa koji predstavljaju neku funkciju; svaki korak sadrži usto upute za slijedeći korak;
- svaki je korak algoritma izvedljiv jednoznačno, a isto tako jednoznačan je i nastavak;
- funkcija svakoga koraka mora biti izvodljiva, čime je osigurano, da je s konačnim brojem elementarnih operacija ostvarljiva svaka funkcija.

Programski jezik oblikuje skup svih uputa za opis algoritama.

Programski su jezici:

- strojno orijentirani, tj. sastoje se iz uputa koje imaju jednaki ili slični sastav kao i naredbe određenog računala;
- problemsko orijentirani, tj. po svom su sastavu prikrojeni problemima koje treba rješavati, a nisu ovisni o uređaju računara;

Nalik na materijalne proizvode, nastaje i programski izradak u više faza od kojih su najznačajnije:

- specifikacija, tj. određivanje uporabnih funkcija ulaznih i izlaznih podataka;
- planiranje: program se dijeli na programske module (pojedine komponente većih programa);
- izvedba: moduli se dalje detaljiraju i kodiraju (zapisuju u određenom programskom jeziku).

S porastom kompliciranosti zadataka rastu i troškovi za programsku opremu.

Naprave za elektroničku obradu podataka mogu obaviti samo osnovne računske operacije i određene usporedbe po kojima moraju biti izgrađeni algoritmi.

Jednostavni zadaci rješavaju se jednostavnom jednadžbom. Za zadatke iz prirodoslovlja i tehnike često su potrebni sistemi diferencijalnih jednadžbi. Za algoritme je karakteristično stoga, da se komplicirani zadaci rješavaju korakom, putem jednostavnih operacija.

Dijagram toka programa je računska shema kojom je dan cjelokupan tok algoritma (programskog niza). Pojedine korake upisujemo u odgovarajuće okvire (blokove), međusobno ih povežemo i ucrtamo smjer toka. Dijagram toka račva se samo pri odluci da – ne

Simboli za dijagrame odvijanja operacija programa (JUS A.F0.004 – 1971)

Operacija općenito	Modifikacija programa	Linija odvijanja programa
Odluka	Ručna operacija	Priključna točka
Potprogram	Ulaz/izlaz	Granično mjesto

Simboli za dijagrame protoka podataka i dokumenata

Obrada općenito	Ulaz/izlaz	Magnetni disk
Pomoćna funkcija	Memorija ovisna od postrojenja	Matrična memorija
Ručna operacija	Memorija odvojena od sistema	Ilustrirani izlaz
Ručno unošenje	Dokument	Linija protoka podataka
Združivanje	Bušena kartica	Transport nosača podataka
Razlučivanje	Bušena traka	Telekomunikacijska veza
Združivanje/ /razlučivanje	Magnetna traka	Povezivanje
Sortiranje	Magnetni bubanj	Napomena

P r i m j e r : kvadratna jednadžba $ax^2 + bx + c = 0$

Analitičko rješenje: $x_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a}\sqrt{b^2 - 4ac}$

Algoritam:

Korak 1	$[a = 0?]$	da: prelaz na korak 2 ne: prelaz na korak 5
Korak 2	$[b = 0?]$	da: prelaz na korak 3 ne: prelaz na korak 4
Korak 3	$[c = 0?]$	da: jednadžbu zadovoljava svaki x ne: jednadžba je protuslovna
Korak 4:	Izračunati $x = -c/b$; svršetak računa.	
Korak 5	Izračunati $d = b^2 - 4\,ac$; prelaz na korak 6	
Korak 6	$[d = 0?]$	da: prelaz na korak 7 ne: prelaz na korak 8
Korak 7	Izračunati $x = -b/2a$; svršetak računa	
Korak 8	Izračunati $e = \sqrt{\lvert d \rvert}$; prelaz na korak 9	
Korak 9	$[d > 0?]$	da: prelaz na korak 10 ne: prelaz na korak 11
Korak 10	Izračunati $x_{1,2} = (-b \pm e)/2a$; svršetak računa	
Korak 11	Izračunati $x_{1,2} = (-b \pm e\mathrm{i})/2a$; svršetak računa.	

Dijagram toka programa:

Programski jezici

Svaki je programski jezik (tj. skup uputa za opis algoritma) jednoznačno sastavljen po određenoj »gramatici«. Znakovi – kao elementi jezika – određeni su odabranim nizovima (brojkama, slovima, posebnim znakovima, simbolima za riječi).

Programskih jezika ima vrlo mnogo. Posebno važni su naredni:

ADA *(nazvan po »prvoj programerki« Augusti Adi Byron)* je jezik za programiranje u prirodoslovlju i tehnici. (Standardiziran u SAD g. 1983.)

ALGOL *(ALGOrithmic Language)* upotrebljava se za prikaz računskih propisa, a naročito za rješavanje numeričko-matematičkih, prirodoslovnih i tehničkih problema
(Početak razvoj: 1958 – ALGOL 58; nato ALGOL 60–68. Standardiziran je u: ISO/R 1538 i DIN 66026.)

APL *(A Programming Language)* služi za opis algoritama.
(Početak razvoja: 1957. Prvi puta upotrebljen za računare IBM 360.)

APT *(Automatically Programed Tools)* namijenjen tehnologiji obrade. Iz njega su se razvili specijalni jezici: EXAPT 1 – za obradu bušenjem, EXAPT 2 – za obradu tokarenjem, EXAPT 3 – za obradu glodanjem.
(Nastao je 1957. Standardiziran je po DIN 66025 – za sastavljanje programa za računarom regulirane alatne strojeve za odvajanje čestica.)

BASIC *(Beginner's All purpose Symbolic Instruction Code)* prikrojen je u prvom redu za probleme prirodoslovlja i tehnike. Veoma je rasprostranjen pri malim osobnim računarima. (Standardiziran u SAD 1978.)

COBOL *(COmmon Business Oriented Language)* služi za potrebe trgovine i računovodstva. (Standardiziran po ISO/R 1989 i DIN 66028.)

FORTRAN *(FORmular TRANslating system)* upotrebljava se u prvom redu za programiranje problema iz prirodoslovlja i tehnike, a upotrebljiv je i na komercijalnom području.
(Početak: 1954., daljnji razvoj: FORTRAN 77. Standardiziran po ISO/R 1539, DIN 66027.)

PASCAL *(imenovan po francuskom matematičaru)* služi za rješavanje numeričkih i nenumeričkih problema. (Postanak: g. 1969. na ETH, Zürich.)

PL 1 *(Programming Language 1)* upotrebljiv za višenamjensku primjenu.
(Standardiziran po ISO/R 6160 i DIN 66225.)

PROLOG *(PROgramming in LOgic)* razvijen je za potrebe umjetne inteligencije.
(Početak: 1972, Marseille.)

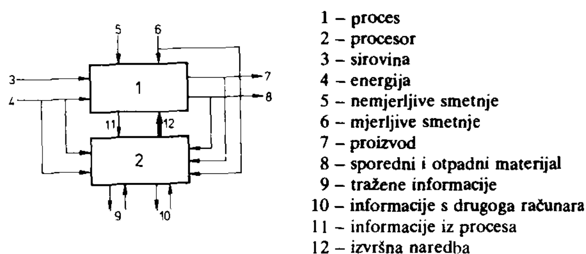
Ostali su programski jezici:
CORAL, FORMAC, GPSS, LISP, LTR, PEARL, REDUCE, RPG, RTL, SNOBOL, SYMAP itd.

Procesni računari

Procesni računari (procesori) su naprave za elektroničku obradu podataka pri raznim tehničkim procesima.

Razvoj tehnologije poluvodiča omogućio je izradu računara znatno manjeg volumena (i cijene) – miniračunar i mikroračunar. U njima je na vrlo maloj površini skupljeno mnogo tisuća sastavnih elemenata (npr. 20000 jednopolnih tranzistora na čipu površine od 35 mm^2).

Mikroprocesori – procesni mikroračunari – većim su dijelom sastavljeni i programirani za određenu svrhu.



1 – proces
2 – procesor
3 – sirovina
4 – energija
5 – nemjerljive smetnje
6 – mjerljive smetnje
7 – proizvod
8 – sporedni i otpadni materijal
9 – tražene informacije
10 – informacije s drugoga računara
11 – informacije iz procesa
12 – izvršna naredba

Procesor dobiva (stalno ili u određenim vremenskim razmacima) informacije o ulaznim veličinama (sirovinama i energiji), o toku proizvodnoga procesa (i mjerljivim smetnjama) te o izlaznim veličinama (proizvodu te o sporednom i otpadnom materijalu). To su analogni signali koji se u pretvaračima pretvaraju u digitalne signale. U procesoru se uspoređuju mjerni podaci sa željama. U skladu s ustanovljenim odstupanjima procesor nato utiče neposredno na proces.

Pomoć računara

Brzina, točnost i preglednost rada s računarom su uzroci za sve opsežniji rad u tehnici pomoću računara. Tako su se razvili značajni radni sistemi, vođeni računarom:

CAD *(Computer Aided Design)* za konstruiranje (planiranje)
CAM *(Computer Aided Manufacturing)* za izradu (produkciju)
CAE *(Computer Aided Engineering)* za optimiranje izradaka (produkta)
CIM *(Computer Integrated Manufaturing)* za sastavljenu (integriranu) izradu
CAP *(Computer Aided Programming)* za programiranje (planiranje rada)
CAQ *(Computer Aided Quality Ensurance)* za osiguranje kvaliteta
itd.

DRUGI DIO

ISPITIVANJE MATERIJALA

DIJAGRAM σ, ε

U ispitnom uzorku (pokusnom štapu) materijala, opterećenom silom F, nastupaju naprezanja σ koja izazivaju rastezanje.

N a p r e z a n j e σ je odnos sile F i presjeka ispitnog uzorka S (okomito na smjer sile)

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Zbog djelovanja sile F (i time nastalim naprezanjem σ) ispitni će se uzorak s prvotne duljine L_0 rastegnuti na duljinu L.

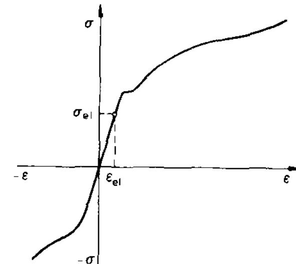
P r o d u l j e n j e epruvete iznosi

$$\Delta L = L - L_0$$

P o s t o t n o p r o d u l j e n j e epruvete je produljenje s obzirom na prvotnu duljinu L_0

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Dijagram σ, ε pokazuje međusobnu ovisnost naprezanja i postotnog produljenja.



Početno je rastezanje linearno (tj. postotno je produljenje upravno razmjerno naprezanju). U području linearnoga rastezanja materijal je *elastičan* (tj. nakon prestanka djelovanja sile odn. naprezanja vraća se na prvotnu dimenziju).

Modul elastičnosti E je odnos naprezanja i postotnog produljenja (u području elastičnosti) $E = \frac{\sigma_{el}}{\varepsilon_{el}}$

»Granica elastičnosti« je naprezanje pri kojem osjetljiva mjerila osjete prvo primjetno, trajno, postotno produljenje materijala (pri još nepromijenjenom presjeku $S = S_0$)*. Povrh te granice (obično na koncu linearnoga rastezanja) materijal se rasteže *plastično* (tj. nakon prestanka djelovanja sile ne vraća se više na prvotnu dimenziju, već ostaje stanovito, trajno, postotno produljenje, a presjek se suzuje: $S < S_0$).

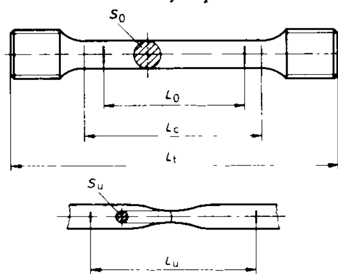
Dijagram σ, ε nastavlja se u smislu tlačnih naprezanja, kad tlačno naprezanje $-\sigma$ izaziva relativno skraćenje $-\varepsilon$.

* Tj. naprezanje tečenja $R_{p\,0,01}$ – vidi str. 316.

MEHANIČKO ISPITIVANJE METALA
(JUS C.A4.001-1986)
Vlačno ispitivanje (JUS C.A4.002-1985)

Za vlačno ispitivanje služe ispitni uzorci koji imaju razne oblike s obzirom na veličinu i oblik raspoloživog materijala i s obzirom na zahvatne čeljusti stroja za kidanje.

1. *Oznake dimenzija ispitnih uzoraka*



L_t – ukupna duljina ispitnog uzorka
L_c – duljina ispitnog dijela ispit. uzorka
L – mjerna duljina*
L_0 – početna mjerna duljina*
L_u – konačna mjerna duljina (nakon kidanja)*
S – površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka
S_0 – početna površina presjeka
S_u – najmanja površina presjeka (nakon kidanja)

* Pri upotrebi ekstenzometra:
L_e – mjerna duljina mjerača produljenja (ekstenzora)
L_{eo} – početna mjerna duljina mjerača
L_{eu} – mjerna duljina mjerača nakon kidanja

2. *Dimenzije ispitnih uzoraka*

Pri proporcionalnom ispitnom uzorku je početna mjerna duljina L_0 razmjerna s korijenom početnog presjeka S_0: $L_0 = k\sqrt{S_0}$ pa je kod ispitnih uzoraka kružnog presjeka proporcionalna promjeru:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} = k\sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot d_0$$

Uobičajene početne duljine L_0 su:

za proporcionalni ispitni uzorak			za presjek ispit. uzorka	
	k	$k\sqrt{\pi/4}$	proizvoljni	kružni
kratki (normalni)	5,65	5	$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_0}$	$L_0 = 5\ d_0$
dugi	11,3	10	$L_0 = 11{,}3\ \sqrt{S_0}$	$L_0 = 10\ d_0$

Primjeri kratkih ispitnih uzoraka:

d_0 mm	S_0 mm^2	L_0 mm	L_c mm
20 ± 0,150	314	100 ± 1,0	110
10 ± 0,075	78,5	50 ± 0,5	55
5 ± 0,040	19,6	25 ± 0,25	28

Pri neproporcionalnim uzorcima početna mjerna duljina L_0 nije ovisna od presjeka S_0 (odn. promjera d_0).

Ispitni uzorci za žice i štapove, promjera do 4 mm moraju imati početnu mjernu duljinu L_0 = 200 ± 2 mm ili L_0 = 100 ± 1 mm.

Ispitni uzorci za limove i trake, debljine 0,1 . . . 3 mm izrezuju se na širine b (12,5 odn. 20 mm), s početnom mjernom duljinom L_0 (50 . . . 80 *mm) i ispitnim duljinama* L_c *(75 odn. 120 mm).*

3. *Oznake veličina pri rastezanju i suživanju*

Pri rastezanju vrijede oznake:

ΔL	$= L - L_0$	mm	– produljenje
ΔL_u	$= L_u - L_0$	mm	– produljenje nakon kidanja
ε	$= (\Delta L/L_0) \cdot 100$	%	– postotno produljenje
A	$= (\Delta L_u/L_0) \cdot 100$	%	– postotno produljenje nakon kidanja

Oznaka A vrijedi za postotno produljenje nakon kidanja u slučaju upotrebe proporcionalnog ispitnog uzorka s vrijednošću koeficijenta k = 5,65. Pri upotrebi proporcionalnih uzoraka s drugim koeficijentom k (npr. 11,3), valja oznaki A dodati tu vrijednost kao indeks (npr. $A_{11,3}$). Pri proporcionalnim uzorcima kružnog presjeka označujemo postotno produljenje nakon kidanja:

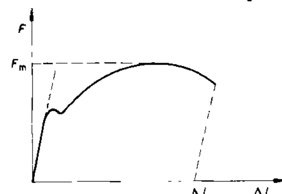
- pri kratkim ispitnim uzorcima A_5
- pri dugim ispitnim uzorcima A_{10}.

Pri upotrebi neproporcionalnog ispitnog uzorka, početne mjerne duljine L_0 (npr. L_0 = 80 mm), treba oznaki A dodati kao indeks vrijednost početne mjerne vrijednosti (npr. A_{80}).

Pri suživanju presjeka vrijede oznake:

ΔS	$= S_0 - S$	mm^2	– suženje poprečnog presjeka
ΔS_u	$= S_0 - S_u$	mm^2	– najveće suženje (nakon kidanja)
ψ	$= (\Delta S/S_0) \cdot 100$	%	– postotno suženje
Z	$= (\Delta S_u/S_0) \cdot 100$	%	– postotno suženje nakon kidanja (kontrakcija)

4. *Oznake sila i nazivnih naprezanja*



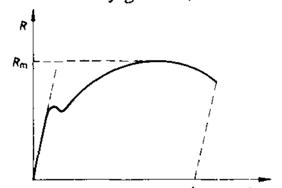
Dijagram F, ΔL

Dijagram sile F u ovisnosti od produljenja ΔL snimamo neposredno na stroju za kidanje

F – (vlačna) sila
F_m – najveća sila

Pri određivanju najveće sile F_m mora brzina razmicanja čeljusti stroja za kidanje iznositi $\leqq L_c$ mm/min (L_c v mm).

*



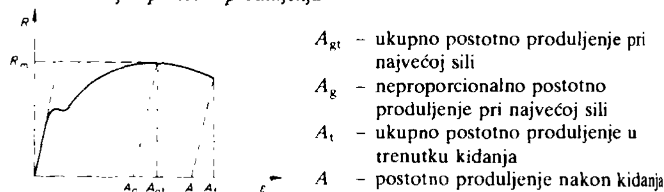
Dijagram R, ε

Nazivna naprezanja R izražena su silom F, dijeljenom s početnim presjekom S_0.

V dijagramu R, ε dana su nazivna naprezanja R u ovisnosti o postotnom produljenju ε, sukladno s dijagramom sile F u ovisnosti od produljenja ΔL.

$R = F/S_0$ – (vlačno) nazivno naprezanje
$R_m = F_m/S_0$ – (vlačna) čvrstoća

5. *Značajna postotna produljenja*



A_{gt} – ukupno postotno produljenje pri najvećoj sili

A_g – neproporcionalno postotno produljenje pri najvećoj sili

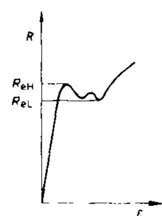
A_t – ukupno postotno produljenje u trenutku kidanja

A – postotno produljenje nakon kidanja

6. *Naprezanja tečenja*

Naprezanja prirodnog tečenja R_e

gornje – R_{eH}
donje – R_{eL}
(npr. kod mekih čelika)



Konvencionalno naprezanje tečenja R_p
(za materijale s kontinuiranim rastezanjem)

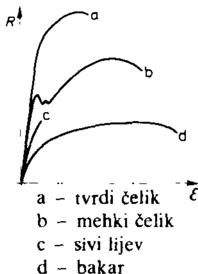
U dijagramu R, ε povučemo iz (odabrane) točke x na apscisi paralelu s početnim (linearnim) dijelom krivulje rastezanja. Presjek paralele s krivuljom rastezanja određuje konvencionalno naprezanje tečenja pri postotnom produljenju $\varepsilon = x\%$, npr.:

$R_{p0.01}$ pri $\varepsilon = 0.01\ \%$[1],
$R_{p0.2}$ pri $\varepsilon = 0.2\ \%$[2],
R_{p1} pri $\varepsilon = 1\%$.

[1] To je »tehnička granica elastičnosti«.
[2] Dosada zvana »granica plastičnosti«

*

Tok rastezanja u ovisnosti od naprezanja je za razne materijale različit i za njih karakterističan. Tako po obliku dijagrama R, ε možemo razlikovati materijale:



a – tvrdi čelik
b – mehki čelik
c – sivi lijev
d – bakar

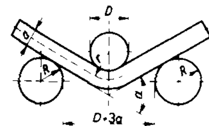
Ž i l a v i materijali se nakon početnog elastičnog (linearnog) rastezanja rastežu do prekida vrlo plastično, i to kontinuirano (npr. bakar) ili u diskontinuitetu s pojavom tečenja pri stalnom naprezanju (npr. meki čelik).

K r h k i materijali se po početnom elastičnom rastezanju kidaju bez (značajnijeg) plastičkog rastezanja (npr. sivi lijev).

P l a s t i č n i materijali se rastežu samo neznatno elastično (npr. olovo) ili su gotovo neelastični (npr. asfalt).

Ispitivanje savijanjem (JUS C.A4.005 – 1985)

Ispitni uzorci imaju pravokutni, kvadratni ili okrugli presjek, a ispituju se i čitavi profili. Debljina a neka bude veća od 30 mm. Širina pravokutnih uzoraka iznosi 25 do 50 mm. Preporučuje se da duljina l ispitnog uzorka bude



$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$$

Za savijanje služe dva oslonca s polumjerima R:
za $a \leqq 12$ mm $R = 25$ mm
za $a > 12$ mm $R = 50$ mm

Promjer D valjka kojim savijamo uzorak uzima se prema posebnim propisima za materijal koji se ispituje.

Savijanje mora biti polagano i neprekidno do određenog kuta savijanja α, odnosno do pojave prvih pukotina na vanjskoj strani uzorka.

*

Sivi lijev ispituje se u pogledu čvrstoće na savijanje sirovim ili obrađenim uzorcima u obliku posebno odlivenih ravnih okruglih štapova promjera d_0, koje oslanjamo o dva valjkasta oslonca s razmakom l (između osi oslonaca promjera D), a u sredini ih opterećujemo silom F do prekida. Čvrstoća sivog lijeva na savijanje σ_{sm} slijedi iz najveće sile F_{sm} pri lomu

$$\sigma_{sm} = F_{sm} l / 4W \qquad W = \pi d_0^3/32 \approx 0.1\ d_0^3$$

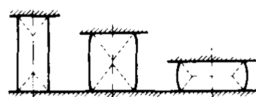
Mjere uzoraka i uređaja (prema JUS C.A4.014 – 1973) u mm

Promjer ispit. uzorka d_0	Duljina ispit. uzorka	Oslonci		Polumjer pritiskivača r
		promjer D	razmak l	
13	300	20 . . . 30	260	10 . . . 15
20	450		400	
30	650	50 . . . 60	600	25 . . . 30
45	1000		900	

Tlačno ispitivanje (JUS C.A4.006 – 1954)

Za tlačni pokus služi ispitni uzorak koji je za kovine redovito okruglog presjeka, promjera d_0 i visine $h_0 = 2d_0$ (izuzetno je $h_0 = d_0 \ldots 3d_0$). Za nekovine uzorak je obično kocka.

Uzorak se tlači lakim i čestim udarcima čekićem ili prešom. Pri tome se pojavljuje »tlačni stožac« po kojem se materijal širi u stranu. Uzorak se tlači do određene visine (u hladnom stanju do $h_0/2$, u vrućem stanju do $h_0/3$), odnosno dok se na boku ne pojave pukotine.



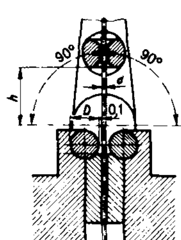
Ispitivanje žica torzijom (JUS C.A4.016 – 1986)

U posebnom uređaju sučemo žicu oko vlastite osi do loma. Da bi žica pri tom ostala ravna, opterećujemo je vlačnom silom koja u žici ne smije izazvati naprezanja većeg od 2% čvrstoće čelične žice, odn. 5% čvrstoće žice od neželjeznih kovina. Slobodna duljina žice l i najveća brzina sukanja n iznose:

premjer žice d (mm)	0,3...(1	1...(1,5	1,5...(3	3...(5	5...(7
slobodna duljina l	200 d	100 d	100 d	100 d	50 d
brzina sukanja n (okr./s)					
– pri čeliku	3	1	1	1	0,5
– pri Cu i Cu-legurama	5	2	1,5	1	0,5

Broj okretaja žice do loma mjera je njene sposobnosti pri ispitivanju torzijom.

Ispitivanje žica izmjeničnim pregibanjem (JUS C.A4.018 – 1986)



Ispitivani komad žice stegnemo u pokusnu napravu u kojoj pregibamo žicu naizmjence u jednu i drugu stranu do njezina loma.

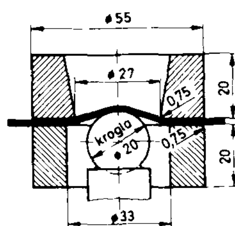
Karakteristične su mjere pokusne naprave (u mm)

d	D	h	d	D	h
0,3 ...0,5	2,5	15	2,0)... 3,0	15,0	25
0,5)...0,7	3,5	15	3,0)... 4,0	20,0	35
0,7)...1,0	5,0	15	4,0)... 6,0	30,0	50
1,0)...1,5	7,5	20	6,0)... 8,0	40,0	75
1,5)...2,0	10,0	20	8,0)...10,0	50,0	100

Žicu pregibamo preko valjaka od kaljenog čelika. Jednim pregibom smatramo savijanje iz početnog (srednjeg) položaja za 90° u jednu stranu i natrag do početnog položaja (a obavljamo ga u 1 s). Broj pregiba do prekida žice mjera je sposobnosti žice za izmjenično pregibanje.

Ispitivanje žica navijanjem (JUS C.A4.019 – 1986).

Ispitivanje sposobnosti za izvlačenje (JUS C.A4.021 – 1962).



Sposobnost materijala za izvlačenje ispituje se utiskivanjem čelične kuglice u limeni ispitni uzorak.

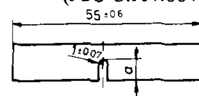
Za limove i trake debljine do 2 mm služi naprava po Erichsenu, koja se stastoji od kaljene čelične kuglice za utiskivanje, matrice i držača limenog uzorka.

Kuglica se polagano i jednoliko (brzinom oko 0,1 mm/s) utiskuje u uzorak do pojave prvih pukotina. Kao mjera sposobnosti materijala za izvlačenje navodi se postignuta dubina.

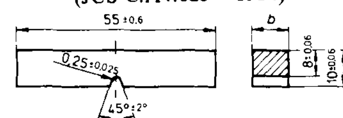
Ispitivanjem udarom po Charpyju

Za ispitivanjem udarom na savijanje po metodi Charpyja upotrebljavaju se ispitni uzorci sa zarezom. Tim se postupkom određuje žilavost materijala pri udaru (s obzirom na utjecaj zareza).

Ispitni uzorak s U-zarezom (JUS C.A4.004 – 1984)



Ispitni uzorak s V-zarezom (JUS C.A4.025 – 1984)

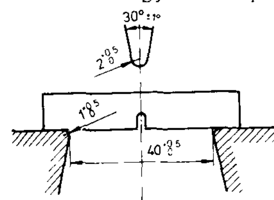


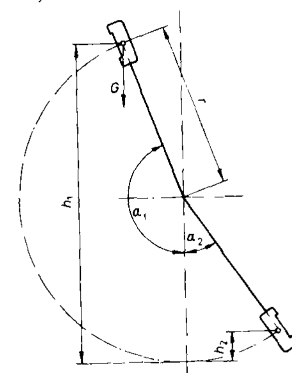
a = 5 mm – standardno, a = 3 (2) mm – plitki zarez } ± 0,09 mm

b = 10 mm – standardno, b = 7,5 (5) mm – uski uzorak } ± 0,11 mm

Ispitni se uzorak prelama batom (njihalom) koji pri padu udari u sredinu uzorka, poduprtoga na oslonce.

Udarna energija bata Gh_1 = 300 (150, 100) J.



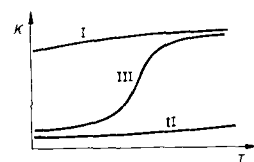


Udarni rad njihajnog bata težine G, koji pada s visine h_1 te dospije pri lomu na visinu h_2 iznosi

$$K = G(h_1 - h_2)$$

Oznaka udarnog rada pri nazivnoj energiji 300 J i pri standardnom ispitnom uzorku je:

- pri uzorku s U-zarezom: *KU*
- pri uzorku s V-zarezom: *KV*



Udarna žilavost u općem slučaju raste s temperaturom. U širokom su temperaturnom području udarno vrlo žilave kovine koje možemo gnječiti: Al, Cu, Ni, austenitni čelik (I); neznatno žilave su krhke materije: staklo, keramika, vrlo tvrdi čelici (II). Za obične čelike – nelegirane i malo legirane (III) značajna je velika ovisnost udarne žilavosti od temp.: pri višoj su vrlo žilavi, pri niskoj veoma krhki.

ISPITIVANJE TRAJNE ČVRSTOĆE

Ispitivanje trajne statičke čvrstoće

Konstantnom (statičkom) silom dugotrajno opterećeni materijal počet će se pod određenim opterećenjem, u ovisnosti od temperature, postupno rastezati. Ova se pojava, koju nazivamo *puženje*, zaustavlja, ako se materijal pri rastezanju učvrsti, dok se u protivnom nastavlja do loma.

Temperatura pri kojoj se pojavljuje puženje ovisna je o materijalu (npr. pri čeliku od 200 °C naviše; pri olovu ili plastici već kod okolišnje temperature).

Najveće naprezanje kod kojega se pri određenoj temperaturi konstantnom silom opterećeni materijal više trajno ne rasteže (ne puže) nazivamo *trajnom statičkom čvrstoćom materijala*.

Dugotrajnim je pokusima (100000 h) ustanovljeno, da stvarnu trajnu statičku čvrstoću ni nakon tako dugog vremena ne možemo odrediti. Odrediti možemo u svakom slučaju samo vremenska statička svojstva čvrstoće koja vrijede za određeno ograničeno trajanje opterećenja.

Rezultati kratkotrajnih ispitivanja ne mogu se jednostavno upotrebiti pri dugotrajnim opterećenjima. Stoga je preporučljivo trajanje statičkog ispitivanja

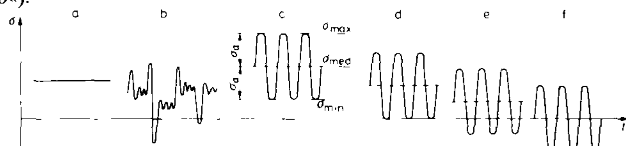
za kovine t = 100 000 h
za plastične materijale t = 10 000 h.

Vremensko naprezanje tečenja $R_{p\ \varepsilon/t/T}$ je naprezanje pri kojem se materijal rastegne do određenog postotnog produljenja ε (npr. 1%) za određeno vrijeme t (npr. 100000 h) pri određenoj temperaturi T (npr. 400 °C), što bi se za navedeni slučaj napisalo $R_{p\ 1/100000/400}$.

Vremenska statična čvrstoća $R_{m\,t/T}$ je najveće naprezanje koje materijal podnosi određeno vrijeme t (npr. 100 000 h) pri određenoj temperaturi T (npr. 600 °C). U navedenom slučaju označujemo to $R_{m\,100000/600}$.

Ispitivanje dinamičke čvrstoće (JUS C.A4.035 – 1966)

Čvrstoća je materijala znatno manja ako materijal u toku vremena t nije jednoliko opterećen (primjer »a« na donjoj slici), već nejednoliko (primjer »b«).



Potpuno nejednolika opterećenja nisu prikladna za uspoređivanje ispitnih rezultata. Zato određujemo dinamička svojstva čvrstoće materijala za sinusoidna opterećenja, kod kojih naprezanje koleba za otklon (amplitudu) σ_a (τ_a) od srednjeg naprezanja σ_{med} (τ_{med}) (primjer »c«). Ta naprezanja mogu biti:

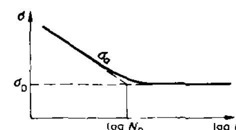
a) istosmjerna (primjeri »c« i »d«) b) izmjenična (primjeri »e« i »f«).

Od raznih sinusoidnih opterećenja posebno su značajna:

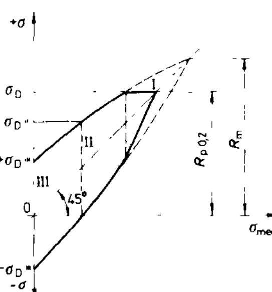
1. *pulzirajuće ili titrajno dinamičko opterećenje* (primjer »d« na slici na str. 320), pri kojem naprezanje σ titra (pulzira) za amplitudu σ_a između vrijednosti 0 i σ_{max} oko srednjeg naprezanja σ_{med}; $\sigma_a = \sigma_{med} = \sigma_{max}/2$;

2. *nihajuće ili kolebljivo dinamičko opterećenje* (primjer »f«), pri kojem naprezanje σ koleba za amplitudu σ_a između vrijednosti $-\sigma_{max}$ i $+\sigma_{max}$; $\sigma_a = \sigma_{max}$, pri čemu je srednje naprezanje $\sigma_{med} = 0$.

Trajnost materijala ovisi o broju titraja opterećenja. Smanjivanjem amplitude naprezanja σ_a pri dinamičkom opterećenju povećava se broj titraja N, koje materijal podnosi bez loma.



Ovisnost $\sigma_a = f(N)$ prikazuje »Wöhlerova krivulja« (na slici desno). Wöhlerova se krivulja pri određenom broju titraja N_D (10^7 za čelik, 10^8 za lake kovine) približava stalnoj vrijednosti σ_D, kojom definiramo »dinamičku čvrstoću«.



Dinamička čvrstoća σ_D je najveće naprezanje σ_{max} pri kojem se materijal ni pri bilo kakvom povećanju broja titraja opterećenja ne bi više slomio.

Dijagram dinamičke čvrstoće (Smithov dijagram) prikazuje dinamičku čvrstoću σ_D u ovisnosti o srednjem naprezanju σ_{med} za razna dinamička opterećenja:

I $\sigma_D' = R_{p0,2}$ – za mirno opterećenje
II 0 . . . σ_D'' – za pulzirajuće opterećenje
III $-\sigma_D'''$ . . . $+\sigma_D'''$ – za njihajuće opterećenje.

Crta koja u dijagramu ide iz izhodišta pod kutom od 45° prikazuje srednje opterećenje. Udaljenosti od nje prema gore ili dolje do gornjega odnosno donjega graničnog naprezanja jesu otkloni naprezanja.

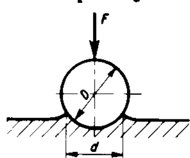
Budući da materijal u konstrukcijama po pravilu ne smijemo opterećivati iznad naprezanja tečenja $R_{p\,0,2}$ je tom granicom u dijagramu dinamičke čvrstoće ograničeno područje dopuštenog opterećenja.

Na dinamičku čvrstoću veoma jako utječe djelovanje zareza (nejednolika razdioba naprezanja), što može čvrstoću znatno sniziti ispod vrijednosti koju materijal ima bez zareza. Zato je dinamička čvrstoća zavarenih spojeva (zbog zavarnog »zareza«) ili predmeta s grubo obrađenom površinom (koja se zapravo sastoji od mnogih sitnih »zareza«) mnogo manja.

ISPITIVANJE TVRDOĆE

Mjera za tvrdoću ovisi o postupku ispitivanja.

1. **Ispitivanje tvrdoće po Brinellu** HB (JUS C.A4.003 – 1985 i 032 – 1986)



U čistu se i ravnu površinu pokusnog materijala (kovine) utiskuje određenom silom F(N) kuglica promjera D(mm). Mjeri se promjer otiska d(mm). Mjera Brinellove tvrdoće iznosi

$$\mathrm{HB} = \frac{0{,}102\,F}{A} = 0{,}102\,F\frac{2}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

gdje je A površina otiska (kalote).

Vrijednosti Brinellove tvrdoće HB za pojedine promjere otiska d sabrane su u tablicama na str. 324 i 325. Odlučujuća je prosječna vrijednost koja je rezultat barem dvaju mjerenja.

Kuglica je: do tvrdoće 450 HB od zakaljenog čelika, do tvrdoće 650 HB od tvrdog metala. (Tvrdoća iznad 650 HB ispituje se po Vickersu – str. 326).

Sila pritiska F mora rasti do nazivne 2 . . . 8 s, a djelovanje nazivne sile mora trajati 10 . . . 15 s.

Upotrebljavaju se slijedeće sile pritiska F (N) odn. odgovarajuće vrijednosti 0,102 F (u zagradi) i promjeri kuglica D (mm) – raspoređene u skupine po vrijednostima 0,102 F/D^2:

$\frac{0{,}102\,F}{D^2}$	F N (0,102 F) za D mm: 10	5	2,5	2	1
30	29420 (3000)	7355 (750)	1839 (187,5)	1177 (120)	294,2 (30)
15	14710 (1500)	–	–	–	–
10	9807 (1000)	2452 (250)	612,9 (62,5)	392,2 (40)	98,07 (10)
5	4903 (500)	1226 (125)	306,5 (31,25)	196,1 (20)	49,03 (5)
2,5	2452 (250)	612,9 (62.5)	153,2 (15,625)	98,07 (10)	24,52 (2,5)
1,25	1226 (125)	306,5 (31,25)	76,61 (7,8125)	49,03 (5)	12,26 (1,25)
1	980,7 (100)	245,2 (25)	61,29 (6,25)	39,23 (4)	9,807 (1)

Primjeri oznaka tvrdoće po Brinellu:

350 HBS 5/750 – znači tvrdoću 350 HB pri upotrebi čelične kuglice promjera D = 5 mm i pri vrijednosti 0,102 F = 750 (tj. pri sili pritiska F = 7355 N).

Vrijednosti 0,102 F/D^2 odabiremo s obzirom na vrstu materijala ispitnog uzorka i njegovoj tvrdoći:

Materijal	Tvrdoća HB	0,102 F/D^2
čelik		30
lijevano željezo	< 140 > 140	10 30
bakar i bakrene slitine	< 35 35...200 > 200	5 10 30
lake kovine i slitine	< 35 35...80 > 80	1,25 2,5 5 10 15 10 15
olovo i kositar		1 1,25

Najmanja debljina uzorka (u mm) u ovisnosti od promjera kuglice D i promjera otiska d:

d mm	D mm 1	2	2.5	5	d mm	D mm 5	10
0,2	0,08				2,4	2,46	1,17
0,3	0,18				2,6	2,92	1,38
0,4	0,33				2,8	3,43	1,60
0,5	0,54	0,25			3,0	4,00	1,84
0,6	0,80	0,37	0,29		3,2		2,10
0,7		0,51	0,40		3,4		2,38
0,8		0,67	0,53		3,6		2,68
0,9		0,86	0,67		3,8		3,00
1,0		1,07	0,83		4,0		3,34
1,1		1,32	1,02		4,2		3,70
1,2		1,60	1,23	0,58	4,4		4,08
1,3			1,46	0,69	4,6		4,48
1,4			1,72	0,80	4,8		4,91
1,5			2,00	0,92	5,0		5,36
1,6				1,05	5,2		5,83
1,7				1,19	5,4		6,33
1,8				1,34	5,6		6,86
1,9				1,50	5,8		7,42
2,0				1,67	6,0		8,00
2,2				2,04			

Za čelik možemo iz poznate Brinellove tvrdoće HB približno odrediti njegovu čvrstoću R_m (N/mm²)

za ugljični čelik $R_m \approx 3{,}6$ HB
za legirani čelik – Cr $R_m \approx 3{,}5$ HB
– Cr–Ni $R_m \approx 3{,}4$ HB

Usporedbena tablica (približna) između čvrstoće i tvrdoće čelika nalazi se na str. 322 i 323.

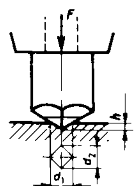
Tvrdoća po Brinellu HB

Promjer otiska d mm, pri promjeru kuglice D mm: 10	5	2,5	2	1	Tvrdoća po Brinellu HB, za vrijednost $0,102F/D^2$: 30	15	10	5	2,5	1,25	1
2,40	1,20	0,60	0,48	0,24	653	327	218	109	54,5	27,2	21,8
2,45			0,49		627	313	209	104	52,2	26,1	20,9
2,50	1,25		0,50	0,25	601	301	200	100	50,1	25,1	20,0
2,55			0,51		578	289	193	96,3	48,1	24,1	19,3
2,60	1,30	0,65	0,52	0,26	555	278	185	92,6	46,3	23,1	18,5
2,65			0,53		534	267	178	89,0	44,5	22,3	17,8
2,70	1,35		0,54	0,27	514	257	171	85,7	42,9	21,4	17,1
2,75			0,55		495	248	165	82,6	41,3	20,6	16,5
2,80	1,40	0,70	0,56	0,28	477	239	159	79,6	39,8	19,9	15,9
2,85			0,57		461	230	154	76,8	38,4	19,2	15,4
2,90	1,45		0,58	0,29	444	222	148	74,1	37,0	18,5	14,8
2,95			0,59		429	215	143	71,5	35,8	17,9	14,3
3,00	1,50	0,75	0,60	0,30	415	207	138	69,1	34,6	17,3	13,8
3,05			0,61		401	200	134	66,8	33,4	16,7	13,4
3,10	1,55		0,62	0,31	388	194	129	64,6	32,3	16,2	12,9
3,15			0,63		375	188	125	62,5	31,3	15,6	12,5
3,20	1,60	0,80	0,64	0,32	363	182	121	60,5	30,3	15,1	12,1
3,25			0,65		352	176	117	58,6	29,3	14,7	11,7
3,30	1,65		0,66	0,33	341	170	114	56,8	28,4	14,2	11,4
3,35			0,67		331	165	110	55,1	27,5	13,8	11,0
3,40	1,70	0,85	0,68	0,34	321	160	107	53,4	26,7	13,4	10,7
3,45			0,69		311	156	104	51,8	25,9	13,0	10,4
3,50	1,75		0,70	0,35	302	151	101	50,3	25,2	12,6	10,1
3,55			0,71		293	147	97,7	48,9	24,4	12,2	9,77
3,60	1,80	0,90	0,72	0,36	285	142	95,0	47,5	23,7	11,9	9,50
3,65			0,73		277	138	92,3	46,1	23,1	11,5	9,23
3,70	1,85		0,74	0,37	269	135	89,7	44,9	22,4	11,2	8,97
3,75			0,75		262	131	87,2	43,6	21,8	10,9	8,72
3,80	1,90	0,95	0,76	0,38	255	127	84,9	42,4	21,2	10,6	8,49
3,85			0,77		248	124	82,6	41,3	20,6	10,3	8,26
3,90	1,95		0,78	0,39	241	121	80,4	40,2	20,1	10,0	8,04
3,95			0,79		235	117	78,3	39,1	19,6	9,79	7,83
4,00	2,00	1,00	0,80	0,40	229	114	76,3	38,1	19,1	9,53	7,63
4,05			0,81		223	111	74,3	37,1	18,6	9,29	7,43
4,10	2,05		0,82	0,41	217	109	72,4	36,2	18,1	9,05	7,24
4,15			0,83		212	106	70,6	35,3	17,6	8,82	7,06
4,20	2,10	1,05	0,84	0,42	207	103	68,8	34,4	17,2	8,61	6,88
4,25			0,85		201	101	67,1	33,6	16,8	8,39	6,71

Promjer otiska d mm, pri promjeru kuglice D mm: 10	5	2,5	2	1	Tvrdoća po Brinellu HB, za vrijednost $0,102\ F/D^2$: 30	15	10	5	2,5	1,25	1
4,30	2,15		0,86	0,43	197	98,3	65,5	32,8	16,4	8,19	6,55
4,35			0,87		192	95,9	63,9	32,0	16,0	7,99	6,39
4,40	2,20	1,10	0,88	0,44	187	93,6	62,4	31,2	15,6	7,80	6,24
4,45			0,89		183	91,4	60,9	30,5	15,2	7,62	6,09
4,50	2,25		0,90	0,45	179	89,3	59,5	29,8	14,9	7,44	5,95
4,55			0,91		174	87,2	58,1	29,1	14,5	7,27	5,81
4,60	2,30	1,15	0,92	0,46	170	85,2	56,8	28,4	14,2	7,10	5,68
4,65			0,93		167	83,3	55,5	27,8	13,9	6,94	5,55
4,70	2,35		0,94	0,47	163	81,4	54,3	27,1	13,6	6,78	5,43
4,75			0,95		159	79,6	53,0	26,5	13,3	6,63	5,30
4,80	2,40	1,20	0,96	0,48	156	77,8	51,9	25,9	13,0	6,48	5,19
4,85			0,97		152	76,1	50,7	25,4	12,7	6,34	5,07
4,90	2,45		0,98	0,49	149	74,4	49,6	24,8	12,4	6,20	4,96
4,95			0,99		146	72,8	48,6	24,3	12,1	6,07	4,86
5,00	2,50	1,25	1,00	0,50	143	71,3	47,5	23,8	11,9	5,94	4,75
5,05			1,01		140	69,8	46,5	23,3	11,6	5,81	4,65
5,10	2,55		1,02	0,51	137	68,3	45,5	22,8	11,4	5,69	4,55
5,15			1,03		134	66,9	44,6	22,3	11,1	5,57	4,46
5,20	2,60	1,30	1,04	0,52	131	65,5	43,7	21,8	10,9	5,46	4,37
5,25			1,05		128	64,1	42,8	21,4	10,7	5,34	4,28
5,30	2,65		1,06	0,53	126	62,8	41,9	20,9	10,5	5,24	4,19
5,35			1,07		123	61,5	41,0	20,5	10,3	5,13	4,10
5,40	2,70	1,35	1,08	0,54	121	60,3	40,2	20,1	10,1	5,03	4,02
5,45			1,09		118	59,1	39,4	19,7	9,85	4,93	3,94
5,50	2,75		1,10	0,55	116	57,9	38,6	19,3	9,66	4,83	3,86
5,55			1,11		114	56,8	37,9	18,9	9,47	4,73	3,79
5,60	2,80	1,40	1,12	0,56	111	55,7	37,1	18,6	9,28	4,64	3,71
5,65			1,13		109	54,6	36,4	18,2	9,10	4,55	3,64
5,70	2,85		1,14	0,57	107	53,5	35,7	17,8	8,92	4,46	3,57
5,75			1,15		105	52,5	35,0	17,5	8,75	4,38	3,50
5,80	2,90	1,45	1,16	0,58	103	51,5	34,3	17,2	8,59	4,29	3,43
5,85			1,17		101	50,5	33,7	16,8	8,42	4,21	3,37
5,90	2,95		1,18	0,59	99,2	49,6	33,1	16,5	8,26	4,13	3,31
5,95			1,19		97,3	48,7	32,4	16,2	8,11	4,05	3,24
6,00	3,00	1,50	1,20	0,60	95,5	47,7	31,8	15,9	7,96	3,98	3,18

2. **Ispitivanje tvrdoće po Vickersu** HV (JUS C.A4.033 – 1984)

U površinu ispitanog materijala utisnemo dijamantni šiljak u obliku piramide (s kutom 136°) proizvoljnom silom F.



Vickersova tvrdoća HV se računa iz sile pritiska F (N) i površine utisnutog plašta piramide A (mm^2), koju određujemo mjerenjem dijagonala d_1 i d_2 (mm)

$$HV = 0{,}102\,\frac{F}{A} \qquad A = \frac{d^2}{2\sin(136/2)} \qquad d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV \approx 0{,}1891\,\frac{F}{d^2}$$

Dijagonale d_1 i d_2 mjerimo točnošću od $\pm 0{,}001$ mm.

Debljina ispitnog uzorka mora iznositi najmanje 1,5 d.

Po pravilu upotrebljavamo slijedeće sile pritiska F, koje su raspoređene po zaokruženim vrijednostima 0,102 F dodajući ih (za prikaz upotrebljene sile pritiska) oznaci tvrdoće po Vickersu HV:

F N	49,03	98,07	196,1	294,2	490,3	980,7
0,102 F	5	10	20	30	50	100
HV	HV 5	HV 10	HV 20	HV 30	HV 50	HV 100

Pri mjerenju tvrdoće veoma tankih slojeva upotrebljavamo sile pritiska od 2 . . . 50 N; pri mjerenju mikrotvrdoće (tvrdoće sastavina zrnatih materijala) i manje sile od 2 F.

Vrijednosti Vickersove tvrdoće HV (HV 5, HV 10, HV 100) sabrane su u tablicama na str. 326 do 329.

Za jednake otiske nekon drugom silom F' iznosi Vickersova tvrdoća

$$HV' = HV \cdot \frac{F'}{F}$$

Tvrdoća po Vickersu HV je do vrijednosti 250 HV brojčano jednaka tvrdoći po Brinellu HB   250 HV = 250 HB

povrh ove vrijednosti raste Vickersova tvrdoća brže nego Brinellova, tako da je

$$420\ HV \approx 400\ HB$$

Tvrdoća po Vickersu HV 5

pri sili pritiska F = 49,03 N (0,102 F = 5)
za promjere otisaka d = 0,056 . . . 0,099 mm

d mm	. . . 0	. . . 1	. . . 2	. . . 3	. . . 4	. . . 5	. . . 6	. . . 7	. . . 8	. . . 9
0,05.							2 957	2 854	2 756	2 664
0,06	2 576	2 492	2 412	2 336	2 264	2 195	2 129	2 066	2 005	2 948
0,07	1 892	1 839	1 789	1 740	1 693	1 648	1 605	1 564	1 524	1 486
0,08.	1 449	1 413	1 379	1 346	1 314	1 283	1 254	1 225	1 197	1 171
0,09.	1 145	1 120	1 096	1 072	1 049	1 027	1 006	985	965	946

Tvrdoća po Vickersu HV 10

pri sili pritiska F = 98,07 N (0,102 F = 10)
za promjere otisaka d = 0,100 . . . 0,549 mm

d mm	. . . 0	. . . 1	. . . 2	. . . 3	. . . 4	. . . 5	. . . 6	. . . 7	. . . 8	. . . 9
0,10.	1855	1818	1782	1748	1715	1682	1651	1620	1590	1561
0,11.	1533	1505	1478	1452	1427	1402	1378	1355	1332	1310
0,12.	1288	1267	1246	1226	1206	1187	1168	1150	1132	1114
0,13.	1097	1081	1064	1048	1033	1018	1003	988	974	960
0,14.	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
0,15.	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
0,16.	724	715	707	698	690	681	673	665	657	649
0,17.	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579
0,18.	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0,19.	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0,20.	464	459	454	450	446	441	437	433	429	425
0,21.	421	417	413	409	405	401	397	394	390	387
0,22.	383	380	376	373	370	366	363	360	357	354
0,23.	351	348	345	342	339	336	333	330	327	325
0,24.	322	319	317	314	311	309	306	304	302	299
0,25.	297	294	292	290	287	285	283	281	279	276
0,26.	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0,27.	254	253	251	249	247	245	243	242	240	238
0,28.	237	235	233	232	230	228	227	225	224	222
0,29.	221	219	218	216	215	213	212	210	209	207
0,30.	206	205	203	202	201	199	198	197	195	194
0,31.	193	192	191	189	188	187	186	185	183	182
0,32.	181	180	179	178	177	176	174	173	172	171
0,33.	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0,34.	160	159	159	158	157	156	155	154	153	152
0,35.	151	151	150	149	148	147	146	146	145	144
0,36.	143	142	142	141	140	139	138	138	137	136
0,37.	135	135	134	133	133	132	131	130	130	129
0,38.	128	128	127	126	126	125	124	124	123	123
0,39.	122	121	121	120	119	119	118	118	117	116
0,40.	116	115	115	114	114	113	113	112	111	111
0,41.	110	110	109	109	108	108	107	107	106	106
0,42.	105	105	104	104	103	103	102	102	101	101
0,43.	100	99,8	99,4	98,9	98,5	98,0	97,6	97,1	96,7	96,2
0,44.	95,8	95,4	94,9	94,5	94,1	93,6	93,2	92,8	92,4	92,0
0,45.	91,6	91,2	90,8	90,4	90,0	89,6	89,2	88,8	88,4	88,0
0,46.	87,6	87,3	86,9	86,5	86,1	85,8	85,4	85,0	84,7	84,3
0,47.	84,0	83,6	83,2	82,9	82,5	82,2	81,8	81,5	81,2	80,8
0,48.	80,5	80,2	79,8	79,5	79,2	78,8	78,5	78,2	77,9	77,6
0,49.	77,2	76,9	76,6	76,3	76,0	75,7	75,4	75,1	74,8	74,5
0,50.	74,2	73,9	73,6	73,3	73,0	72,7	72,4	72,1	71,9	71,6
0,51.	71,3	71,0	70,7	70,5	70,2	69,9	69,7	69,4	69,1	68,8
0,52.	68,6	68,3	68,1	67,8	67,5	67,3	67,0	66,8	66,5	66,3
0,53.	66,0	65,8	65,5	65,3	65,0	64,8	64,6	64,3	64,1	63,8
0,54.	63,6	63,4	63,1	62,9	62,7	62,4	62,2	62,0	61,8	61,5

Tvrdoća po Vickersu HV 10

pri sili pritiska F = 98,07 N (0,102 F = 10)
za promjere otisaka d = 0,550 . . . 0,999 mm

d mm	.,..0	.,..1	.,..2	.,..3	.,..4	.,..5	6	.,..7	.,..8	.,..9
0,55.	61,3	61,1	60,9	60,6	60,4	60,2	60,0	59,8	59,6	59,3
0,56.	59,1	58,9	58,7	58,5	58,3	58,1	57,9	57,7	57,5	57,3
0,57.	57,1	56,9	56,7	56,5	56,3	56,1	55,9	55,7	55,5	55,3
0,58.	55,1	54,9	54,7	54,6	54,4	54,2	54,0	53,8	53,6	53,5
0.59.	53,3	53,1	52,9	52,7	52,6	52,4	52,2	52,0	51,9	51,7
0,60.	51,5	51,3	51,2	51,0	50,8	50,7	50,5	50,3	50,2	50,0
0,61.	49,8	49,7	49,5	49,4	49,2	49,0	48,9	48,7	48,6	48,4
0,62.	48,2	48,1	47,9	47,8	47,6	47,5	47,3	47,2	47,0	46,9
0,63.	46,7	46,6	46,4	46,3	46,1	46,0	45,8	45,7	45,6	45,4
0,64.	45,3	45,1	45,0	44,9	44,7	44,6	44,4	44,3	44,2	44,0
0,65.	43,9	43,8	43,6	43,5	43,4	43,2	43,1	43,0	42,8	42,7
0,66.	42,6	42,4	42,3	42,2	42,1	41,9	41,8	41,7	41,6	41,4
0,67.	41,3	41,2	41,1	40,9	40,8	40,7	40,6	40,5	40,3	40,2
0,68.	40,1	40,0	39,9	39,8	39,6	39,5	39,4	39,3	39,2	39,1
0,69.	39,0	38,8	38,7	38,6	38,5	38,4	38,3	38,2	38,1	38,0
0,70.	37,8	37,7	37,6	37,5	37,4	37,3	37,2	37,1	37,0	36,9
0,71.	36,8	36,7	36,6	36,5	36,4	36,3	36,2	36,1	36,0	35,9
0,72.	35,8	35,7	35,6	35,5	35,4	35,3	35,2	35,1	35,0	34,9
0,73.	34,8	34,7	34,6	34,5	34,4	34,3	34,2	34,1	34,0	34,0
0,74.	33,9	33,8	33,7	33,6	33,5	33,4	33,3	33,2	33,1	33,1
0,75.	33,0	32,9	32,8	32,7	32,6	32,5	32,4	32,4	32,3	32,2
0,76.	32,1	32,0	31,9	31,9	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4	31,4
0,77.	31,3	31,2	31,1	31,0	31,0	30,9	30,8	30,7	30,6	30,6
0,78.	30,5	30,4	30,3	30,2	30,2	30,1	30,0	29,9	29,9	29,8
0.79.	29,7	29,6	29,6	29,5	29,4	29,3	29,3	29,2	29,1	29,0
0,80.	29,0	28,9	28,8	28,8	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3
0,81.	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,7	27,6
0,82.	27,6	27,5	27,4	27,4	27,3	27,2	27,2	27,1	27,0	27,0
0,83.	26,9	26,9	26,8	26,7	26,7	26,6	26,5	26,5	26,4	26,3
0,84.	26,3	26,2	26,2	26,1	26,0	26,0	25,9	25,9	25,8	25,7
0,85.	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4	25,4	25,3	25,3	25,2	25,1
0,86.	25,1	25,0	25,0	24,9	24,8	24,8	24,7	24,7	24,6	24,6
0,87.	24,5	24,4	24,4	24,3	24,3	24,2	24,2	24,1	24,1	·24,0
0,88.	23,9	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	23,6	23,5	23,5
0,89.	23,4	23,4	23,3	23,3	23,2	23,2	23,1	23,0	23,0	22,9
0,90.	22,9	22,8	22,8	22,7	22,7	22,6	22,6	22,5	22,5	22,4
0,91.	22,4	22,3	22,3	22,2	22,2	22,2	22,1	22,1	22,0	22,0
0,92.	21,9	21,9	21,8	21,8	21,7	21,7	21,6	21,6	21,5	21,5
0,93.	21,4	21,4	21,3	21,3	21,3	21,2	21,2	21,1	21,1	21,0
0,94.	21,0	20,9	20,9	20,9	20,8	20,8	20,7	20,7	20,6	20,6
0,95.	20,5	20,5	20,5	20,4	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,2
0,96.	20,1	20,1	20,0	20,0	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,8
0,97.	19,7	19,7	19,6	19,6	19,5	19,5	19,5	19,4	19,4	19,3
0,98.	19,3	19,3	19,2	19,2	19,2	19,1	19,1	19,0	19,0	19,0
0,99.	18,9	18,9	18,8	18,8	18,8	18,7	18,7	18,7	18,6	18,6

Tvrdoća po Vickersu HV 100

pri sili pritiska F = 980,7 N (0,102 F = 100)
za promjere otisaka d = 1,00 . . . 1,99 mm

d mm	.,..0	.. 1	2	... 3	.,..4	.,..5	.,..6	... 7	8	9
1,0.	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
1,1.	153	151	148	145	143	140	138	135	133	131
1,2.	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
1,3.	110	108	106	105	103	102	100	98,8	97,4	96,0
1,4.	94,6	93,3	92,0	90,7	89,4	88,2	87,0	85,8	84,7	83,5
1,5.	82,4	81,3	80,3	79,2	78,2	77,2	76,2	75,2	74,3	73,4
1,6.	72,4	71,5	70,7	69,8	69,0	68,1	67,3	66,5	65,7	64,9
1,7.	64,2	63,4	62,7	62,0	61,3	60,6	59,9	59,2	58,5	57,9
1,8.	57,2	56,6	56,0	55,4	54,8	54,2	53,6	53,0	52,5	51,9
1,9.	51,4	50,8	50,3	49,8	49,3	48,8	48,3	47,8	47,3	46,8

Korekturni faktori

d – srednja dijagonala otiska, D – promjer ispitnog uzorka

d/D	Kuglasta površina		Valjkasta površina* ×		Valjkasta površina* +	
	konveksna	konkavna	konveksna	konkavna	konveksna	konkavna
0,005	0,994	1,006	–	–	–	–
0,01	0,989	1,013	0,994	1,006	0,995	1,006
0,015	0,983	1,019	0,991	1,009	0,992	1,009
0,02	0,978	1,025	0,988	1,012	0,990	1,013
0,025	0,973	1,031	0,986	1,015	0,987	1,016
0,03	0,968	1,038	0,983	1,018	0,985	1,020
0,035	0,963	1,045	0,980	1,021	0,982	1,024
0,04	0,958	1,053	0,977	1,024	0,980	1,028
0,045	0,953	1,060	0,974	1,027	0,978	1,032
0,05	0,949	1,068	0,972	1,030	0,977	1,037
0,06	0,941	1,085	0,966	1,036	0,973	1,047
0,07	0,932	1,103	0,961	1,043	0,969	1,059
0,08	0,924	1,122	0,956	1,049	0,966	1,071
0,09	0,917	1,143	0,950	1,056	0,964	1,085
0,10	0,910	–	0,945	1,062	0,961	1,100
0,11	0,903	–	0,940	1,069	0,959	1,118
0,12	0,896	–	0,935	1,076	0,956	1,140
0,13	0,890	–	0,930	1,082	0,954	–
0,14	0,884	–	0,925	1,089	0,952	–
0,15	0,878	–	0,920	1,096	0,951	–
0,16	0,873	–	0,915	1,104	0,949	–
0,17	0,868	–	0,910	1,111	0,948	–
0,18	0,863	–	0,905	1,118	0,946	–
0,19	0,858	–	0,900	1,126	0,945	–
0,20	0,853	–	0,895	1,133	0,944	–
0,21	–	–	–	1,141	0,943	–
0,22	–	–	–	1,148	0,942	–

* × dijagonale otiska pod 45° s osi uzorka
+ jedna dijagonala otiska paralelna s osi uzorka

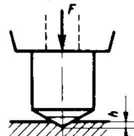
3. **Ispitivanje tvrdoće kovina po Rockwellu**
(ISO, JUS C.A4.031-1980)

Pri Rockwellovoj metodi utiskuje se određenom silom u površinu ispitivanoga materijala posebni utiskivač, pri čemu se ne mjeri površina otiska, već njegova dubina. Utiskivač je dijamantni stožac vršnoga kuta 120° (i polumjera zaokruženja 0,2 mm) ili čelična kuglica promjera 1,5875 mm.

Utiskivač se prisloni na površinu ispitivanoga materijala početnom silom F_0, pri čemu se dobiva otisak dubine h_0. To je ishodišni položaj za koji valja mjerilo za dubinu namjestiti na ishodišnu vrijednost »0«. Nato se poveća pritisak utiskivača (u vremenu od 4 do 8 s) dodatnom silom F_1 na ukupnu silu F. Vrijeme opterećenja ukupnom silom F ovisno je o naklonosti ispitivanoga materijala puženju i traje od 2 s (za materijal bez pojave puženja) do više od 30 s (za materijal s pojavama puženja). Potom se ukloni dodatna sila F_1 te se pri opterećenju početnom silom F_0 očita na mjerilu dubinu otiska e (mm).

Debljina ispitnog uzorka mora iznositi najmanje 8 e.

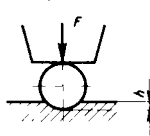
a) *Određivanje tvrdoće stošcem*



Najviše se upotrebljava postupak HRC (za kaljeni čelik i slitine), u posebnim slučajevima još i postupci HRA (za tvrde metale) i HR15N, HR30N i HR45N (za tanke uzorke ili male ispitne plohe). Pritisna sila i odgovarajuća tvrdoća su:

Postupak:	HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N
Sile F_0 N	98,07	98,07	29,42	29,42	29,42
Sile F_1 N	1373	490,3	117,7	264,8	411,9
Sile F N	1471	588,4	147,1	294,2	441,3
HR... =	100–500 e		100–1000 e		

b) *Određivanje tvrdoće kuglicom*



Najviše se upotrebljava postupak HRB (za nekaljeni čelik, mjed, broncu), za posebne svrhe još i postupci HRF (za hladno valjani tanki lim, bakar), HRG (za slitine bakra s fosforom) te HR15T, HR30T i HR45T (za vrlo tanke uzorke ili male ispitne plohe). Pritisna sila i trdoća su:

Postupak:	HRB	HRF	HRG	HR15T	HR30T	HR45T
Sile F_0 N	98,07	98,07	98,7	29,42	29,42	29,42
Sile F_1 N	882,6	490,3	1373	117,7	264,8	411,9
Sile F N	980,7	588,4	1471	147,1	294,2	441,3
HR... =	130–500 e			100–1000 e		

Područja upotrebljivosti postupka za ispitivanje tvrdoće po Rockwellu pri različitim dubinama otiska e

e mm	HRC	HRA	HR 15N	HR 30N	HR 45N	HRB	HRF	HRG	HR 15T	HR 30T	HR 45T
0,010			90						90		
0,020		90	80	80					80	80	
0,030		85	70	70	70				70	70	70
0,040		80		60	60				60	60	60
0,050		75		50	50				50	50	50
0,060	70	70		40	40	100	100	100		40	40
0,070	65	65			30	95	95	95		30	30
0,080	60	60			20	90	90	90		20	20
0,090	55					85	85	85		10	10
0,100	50					80	80	80			
0,110	45					75	75	75			
0,120	40					70	70	70			
0,130	35					65	65				
0,140	30					60	60				
0,150	25					55					
0,160	20					50					
0,170						45					
0,180						40					
0,190						35					

Ispravljene vrijednosti tvrdoće po Rockwellu pri ispitivanju tvrdoće na valjkastim (konveksnim) plohama promjera d

HR...	d (mm) 10	16	25	HR..	d (mm) 10	16	25
HRC HRA				HRB HRF HRG			
20	–	22,5	21,5	30	–	34,5	32,5
30	–	32,0	31,0	40	–	44,0	42,5
40	42,5	41,5	41,0	50	–	53,5	52,0
50	52,0	51,0	50,5	60	65,0	63,0	62,0
60	61,0	60,5	60,5	70	74,0	72,5	71,5
70	71,0	70,5	70,5	80	83,5	82,0	81,5
80	80,5	80,5	80,0	90	93,0	91,5	91,0
90	90,0	90,0	90,0	100	102,5	101,5	100,5
HRN				HRT			
20	22,0	21,5	21,5	20	–	–	22,0
30	32,0	31,5	31,0	30	–	–	32,0
40	41,5	41,0	41,0	40	–	43,0	42,0
50	51,5	51,0	50,5	50	–	52,5	51,5
60	61,0	61,0	60,5	60	63,0	62,0	61,5
70	71,0	70,5	70,5	70	72,5	71,5	71,0
80	80,5	80,5	80,0	80	81,5	81,0	80,5
90	90,0	90,0	90,0	90	91,0	90,5	90,5

Približan odnos različitih mjera tvrdoće i čvrstoće čelika

Tvrdoća po Brinellu HB	Tvrdoća po Vickersu HV	Rockwellu HRB	Rockwellu HRC	Čvrstoća čelika u N/mm^2 C	Cr	Cr-Ni
	1 175		70	2 720	2 640	2 560
	1 085		68	2 680	2 610	2 530
	1 000		66	2 560	2 490	2 420
	930		64	2 460	2 390	2 320
	845		62	2 350	2 290	2 220
	790		60	2 260	2 200	2 130
	735		58	2 160	2 100	2 040
	692		57	2 080	2 020	1 970
	645		55	2 000	1 940	1 880
	608		53	1 920	1 870	1 820
	575		52	1 850	1 800	1 750
	546		50	1 780	1 730	1 680
	520		49	1 720	1 670	1 620
	496		47	1 660	1 610	1 570
	473		46	1 600	1 550	1 510
	454		45	1 550	1 510	1 460
	437	115	44	1 490	1 450	1 410
400	420	114	42	1 440	1 400	1 360
388	404	114	41	1 400	1 360	1 320
375	389	113	40	1 350	1 310	1 280
363	375	113	38	1 310	1 270	1 240
352	363	112	37	1 270	1 220	1 200
341	350	111	36	1 220	1 190	1 160
330	339	111	35	1 190	1 160	1 130
321	327	110	34	1 160	1 120	1 090
311	316	109	33	1 120	1 090	1 060
302	305	108	32	1 090	1 060	1 030
293	296	107	31	1 040	1 020	990
285	287	107	30	1 030	1 000	970
277	279	106	29	1 000	970	940
269	270	105	28	970	940	920
262	263	104	26	940	920	890
255	256	103	25	920	890	870
248	248	102	24	890	870	840
241	241	101	23	870	840	820
235	235	100	22	850	820	800
229	229	99	21	820	800	780
223	223	98	20	800	780	760
217	217	97	19	780	760	740
212	212	96	18	760	740	720
207	207	95	17	750	730	700
201	201	94	16	720	700	680
197	197	93	15	710	690	670
192	192	92	14	690	670	650
187	187	91		670	660	640
183	183	90		660	640	620
179	179	89		640	630	610
174	174	88		630	610	590
170	170	87		610	600	580
167	167	86		600	580	560
163	163	85		590	570	550
159	159	84		570	560	540
156	156	83		560	550	530
152	152	82		550	530	520
149	149	81		540	520	510
146	146	80		530	510	500
143	143	79		520	500	490
140	140	78		500	490	480
137	137	77		490	480	470
133	133	76		480	470	460
131	131	75		470	460	450
128	128	74		460	450	440
126	126	73		450	440	430
123	123	72		440	430	420
121	121	71		440	420	410
118	118	69		430	410	400
116	116	68		420	410	390
114	114	67		410	400	390
111	111	65		400	390	380
109	109	64		390	380	370
107	107	62		390	380	360
105	105	61		380	370	360
103	103	59		370		
101	101	58		360		
99	99	56		360		
97	97	54		350		
95	95	52		340		
92				330		
89				320		
86				310		

4. **Ispitivanje tvrdoće plastičnih tvari**

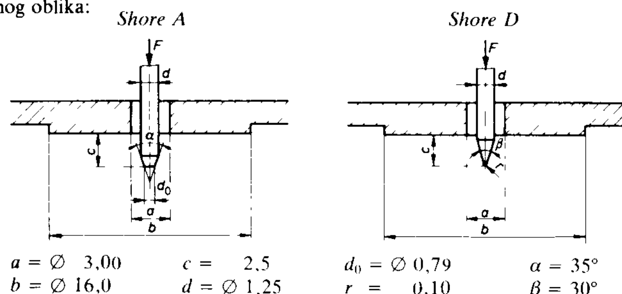
Za ispitivanje tvrdoće termoplasta i gume upotrebljavaju se postupci:

za meke ispitne uzorke – postupak Shore A
za tvrde ispitne uzorke – postupak Shore D.

Za točnija ispitivanja upotrebljava se postupak IRHD.

a) *Postupci Shore A i Shore B* (JUS G.S2.125 – 1986 i G.S2.525 – 1984)

Ispitni uzorak (debljine > 6 mm, promjera > 30 mm) pritisnemo na podlogu pritisnom pločom s rupom, kroz koja utiskujemo utisnu iglu određenog oblika:



Pritisnom pločom pritisnemo epruvetu na podlogu silom 12,5 N (Shore A) odnosno 50 N (Shore D).

Utisnu iglu utiskujemo u uzorke oprugom, čija se opružna sila F (N) mijenja s dubinom otiska h (mm) prema jednadžbama:

za postupak Shore A: $F = 8{,}065 - 3{,}006\ h$
za postupak Shore D: $F = 44{,}50 - 17{,}8\ h$

Tvrdoća H po postupcima Shore A i D određena je dubinom otiska h:

$$H = 100 - 40\ h$$

tako da je:

$H =$ 0 Sh pri $h = 2{,}5$ mm
$H =$ 100 Sh pri $h = 0$ mm

Primjer oznake tvrdoće po postupku Shore A pri nastaloj dubini otiska $h = 0{,}8$ mm: $H = 68$ Sh A.

Temperatura ispitivanja je 23 °C ± 2 °C.

Jedinice tvrdoće po Shoru	Dubina otiska F (N)	Opružna sila F (N) Shore A	Shore D
0	2,5	0,55	0
10	2,25	1,30	4,45
20	2,0	2,05	8,90
30	1,75	2,805	13,35
40	1,5	3,555	17,80
50	1,25	4,305	22,25
60	1,0	5,06	26,70
70	0,75	5,81	31,15
80	0,5	6,56	35,60
90	0,25	7,31	40,05
100	0	8,065	44,50

b) *Postupak po međunarodnoj skali za tvrdoću za gumu IRHD (International Rubber Hardness Degree)* (JUS G.S2.143 – 1986)

Po tom se postupku ispituje u prvom redu tvrdoća (meke) gume i to utisnom dubinom h (mm) čelične kuglice, određenog promjera D, pri određenoj sili pritiska.

Ispitne uzorke pritiščemo na podlogu pritisnom pločom silom 8,3 N.

Početna sila pritiska na kuglicu iznosi 0,3 N, dodatna 5,4 N, a ukupna 5,7 N. Mjeri se dubina otiska h koji određuje tvrdoću IRHD po slijedećoj tablici, a za ispitivanje kuglicom promjera D:

– za manju tvrdoću $D = 5$ mm
– za osrednju tvrdoću $D = 2{,}5$ mm
– za veliku tvrdoću $D = 1$ mm

$D = 5$ mm				$D = 2{,}5$ mm				$D = 1$ mm	
h mm	IRHD	h mm	IRHD	h mm	IRHD	h mm	IRHD	h mm	IHRD
1,10	34,9	2,10	17,8	0,00	100	1,00	48,8	0,02	100
1,15	33,6	2,15	17,3	0,05	99,3	1,05	47,1	0,06	99,6
1,20	32,4	2,20	16,8	0,10	97,1	1,10	45,6	0,10	98,8
1,25	31,2	2,25	16,3	0,15	94,0	1,15	44,1	0,12	98,3
1,30	30,0	2,30	15,8	0,20	90,6	1,20	42,7	0,14	97,6
1,35	29,0	2,35	15,3	0,25	87,1	1,25	41,4	0,16	97,0
1,40	28,0	2,40	14,9	0,30	83,6	1,30	40,1	0,18	96,2
1,45	27,0	2,45	14,5	0,35	80,2	1,35	38,9	0,20	95,4
1,50	26,1	2,50	14,1	0,40	77,0	1,40	37,8	0,22	94,6
1,55	25,2	2,55	13,7	0,45	73,9	1,45	36,7	0,24	93,8
1,60	24,4	2,60	13,4	0,50	71,0	1,50	35,6	0,26	92,9
1,65	23,6	2,65	13,0	0,55	68,2	1,55	34,6	0,28	92,0
1,70	22,8	2,70	12,7	0,60	65,5	1,60	33,6	0,30	91,1
1,75	22,0	2,75	12,4	0,65	63,0	1,65	32,6	0,32	90,2
1,80	21,3	2,80	12,1	0,70	60,6	1,70	31,7	0,34	89,3
1,85	20,7	2,85	11,8	0,75	58,3	1,75	30,9	0,36	88,4
1,90	20,1	2,90	11,5	0,80	56,2	1,80	30,0	0,38	87,5
1,95	19,5	2,95	11,2	0,85	54,2			0,40	86,6
2,00	18,9	3,00	11,0	0,90	52,3			0,42	85,7
2,05	18,4	3,05	10,7	0,95	50,5			0,44	84,8

Primjer oznake tvrdoće po postupku IRHD: $H = 70$ IRHD

Određivanje temperature smekšavanja termoplasta – po Vicatu
(JUS G.S2.641 – 1970)

Upotrebljavamo ispitni uzorak oblika kvadratne pločice, bridova 10 mm i debljine 3...6,4 mm.

Određujemo temperaturu pri kojoj se utisna igla, promjera kružnog presjeka 1,000 ± 0,015 mm utisne 1 mm duboko u uzorak pri opterećenju koje iznosi 9,81 N po metodi A ili 49,03 N po metodi B.

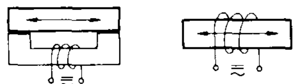
Ispitni uzorak zagrijavamo u tekućini (npr. u parafinu, glicerinu, transformatorskom ili silikonskom ulju i sl.).

ISPITIVANJA BEZ OŠTEĆIVANJA MATERIJALA

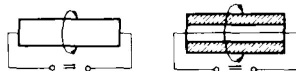
Magnetsko ispitivanje

Predmete koji se mogu magnetizirati (sivi lijev, čelik) premažemo slojem rijetkog ulja (petroleja) kojemu smo dodali željeznog praha te ih magnetiziramo. U homogenom materijalu nastaje jednoliko magnetsko polje, pri čemu se i željezni prah raspodijeli jednoliko. Svaka nehomogenost u materijalu (šupljine, strana tijela) ili sitne, za oko nevidljive pukotine, uzrokuju otklon magnetskog polja, što se očituje u nejednolikoj raspodjeli željeznog praha na površini i time se otkrivaju pogreške. One će se pokazati iako su pod površinom.

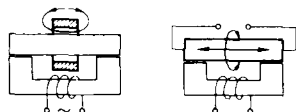
Otklon magnetskog polja osobito je jak ako su pogreške okomite na smjer magnetskog polja, dok pogreške u smjeru polja na nj bitno ne utječu. Zato predmet treba ispitivati u magnetskim poljima koja su međusobno okomita, kako bismo mogli otkriti sve pogreške.



a) Za poprečno smještene pogreške magnetiziramo predmet pomoću magneta ili električnog svitka. Magnetsko je polje usmjereno uzduž predmeta te otkriva poprečne pogreške.



b) Za uzdužne pogreške uključujemo predmet kao otpornik u električni vod kojim teče jaka struja (200...1500 A). Ta struja izaziva okomito na svoj smjer (tj. poprečno) magnetsko polje, koje otkriva uzdužne pogreške. Ako je predmet šupalj, provlačimo električni vodič kroz šupljinu.



Šuplji predmet možemo upotrijebiti i kao sekundarni namot transformatora pa time u njemu otkrivamo poprečne pogreške (lijeva slika).

Kombinirani uređaji omogućuju pregled na oba načina (desna slika).

Ispitivanje ultrazvukom

Ultrazvuk je mehaničko titranje frekvencijom $f > 20$ kHz. U biti on ima ista svojstva kao i čujni zvuk ($f = 16 \ldots 20000$ Hz), ali se ultrazvukom može prenositi mnogo veća energija, koju iskorištavamo za ispitivanje materijala.

Ultrazvuk dobivamo na različite načine. Za ispitivanje materijala najčešće upotrebljavamo piezoelektrični efekt kremenog kristala, tj. njegovu deformaciju zbog djelovanja električnog polja. Izložimo li takav kristal djelovanju izmjeničnog električnog napona, on će se rastezati i stezati s frekvencijom napona. Nastat će mehaničko titranje – ultrazvuk.

Ultrazvuk prenosimo na okolinu prisnim dodirom kremenog kristala s površinom predmeta. Kroz homogeni materijal prodire ultrazvuk veoma dobro. Dubina prodiranja ultrazvuka ovisna je o njegovoj frekvenciji i o materijalu. Ako je dovoljno jak, prodire do suprotne plohe predmeta (stijenke) i od nje se odbija. Na taj način možemo — pomoću reflektiranog zvuka — odrediti debljinu predmeta. Najmanji prekidi u materijalu (već i zračni raspor širine od samo 10^{-3} mm) za ultrazvuk su skoro nepremostiva zapreka, to veća, što je frekvencija zvuka viša. Na tim se zaprekama ultrazvuk odbija, a reflektirani ultrazvuk ih otkriva.

Ispitivanje sivog lijeva ultrazvukom gotovo da ne dolazi u obzir zbog prevelike apsorpcije zvuka u njemu.

Ispitivanja rendgenskim zrakama

Rendgenske su zrake elektromagnetski titraji valne duljine 0,2 do 0,002 nm. Zrake veće valne duljine (oko 0,1 nm) nazivamo »mekim«, a one manje valne duljine »tvrdim«. Što su rendgenske zrake tvrđe, to lakše prodiru kroz tvar – ona ih manje apsorbira. Energija rendgenskih zraka mora biti to veća, što je deblji materijal kroz koji treba da prodru.

Rendgenske zrake, koje dobivamo rendgenskim cijevima, upotrebljavamo za ispitivanje materijala, i to za:

a) finostrukturno ispitivanje, koje se zasniva na svojstvu rendgenskih zraka, da se u kristalima ogibaju i odbijaju. Time nam otkrivaju razmještaj atoma u kristalima i smjer osi kristala;

b) grubostrukturno ispitivanje, koje se zasniva na svojstvu rendgenskih zraka, da ih tvari manje gustoće slabije apsorbiraju nego gušće tvari. Rendgenske zrake, koje izviru gotovo iz točke i šire se pravocrtno, bacaju na fluorescentni zaslon ili na fotografsku ploču sjene različite jakosti, prema tome je li tvar gušća ili rjeđa, i tako otkrivaju njihove oblike. Na taj način opažamo — bez oštećivanja materijala — pogreške u nutrini materijala (šupljine, pukotine, trosku itd.). Najfinije pak pukotine (koje ustanovljujemo ultrazvukom) ne možemo zapaziti rendgenskim zrakama.

Pri ispitivanju rendgenskim zrakama služimo se uređajem u kojemu je rendgenska cijev pod naponom od 80...300 kV (iznimno i do 600 kV). Probojna moć iznosi:

pri 80 kV — 40 mm Al	pri 200 kV — 60 mm Fe
pri 110 kV — 100 mm Al	pri 230 kV — 60 mm Cu

Ispitivanje γ-zrakama

γ-zrake su elektromagnetski valovi duljine oko 0,0005 nm (= 0,5 pm). Te su zrake tvrđe od rendgenskih i stoga dublje prodiru u materijal. γ-zrake dobivamo iz radija ili mezotorija, te — u novije vrijeme — osobito iz izotopa kobalta 60. Pomoću tih zraka možemo ispitivati materijal do debljine 250 mm. Sliku što je daju γ-zrake dobivamo na fotografskoj ploči, a osvetljavanje traje i po nekoliko dana.

ISPITIVANJE SASTAVA MATERIJALA

Kemijska analiza

Kemijskom analizom određujemo kvalitativni i kvantitativni sastav materijala. Za određivanje glavnih sastavina dovoljno je nekoliko grama materijala; za određivanje primjesa i nečistoća potrebno je 10 do 50 grama, u iznimnim slučajevima pri analizi male količine nečistoća i do 1 kg.

Za brzo ustanovljivanje pojedinih elemenata u materijalu služimo se različitim postupcima karakterističnih površinskih reakcija, koje međutim otkrivaju samo sastav površinskog sloja.

Spektralna analiza

U užarenom stanju atomi emitiraju svjetlosne zrake koje imaju za svaki element karakteristične valne duljine. Odgovarajuće spektralne crte ovise samo o kemijskom sastavu, dok njihov intenzitet ovisi o udjelu pojedinih elementa u ispitivanoj tvari. Osjetljivost je toga postupka veoma velika i na taj se način mogu ustanoviti elementi kojih količina iznosi 0,01 % i manje. Zato je taj postupak osobito prikladan kod manjih koncentracija.

Spektralna je analiza ograničena na veoma usko područje užarenog mjesta na površini materijala. To, međutim, omogućuje i analizu sitnih stranih primjesa u materijalu.

Spektralnom analizom možemo nadomjestiti kvalitativnu, a u ograničenom opsegu i kvantitativnu kemijsku analizu. Za nju dostaju veoma mali djelići materijala; možemo je primijeniti i na gotovim predmetima, a da ih time ne oštetimo. Ako pak za spektralnu analizu izrađujemo posebne ispitne uzorke, njihove su prikladne dimenzije 30 × 5 × 1 mm.

Ispitivanje iskrenjem pri brušenju

Za brzo, a grubo, razlikovanje pojedinih vrsta čelika, sivoga i temperovanog lijeva te tvrdih metala služe nam slike i boje pri brušenju, koje su karakteristične za pojedini materijal (vidi str. 339).

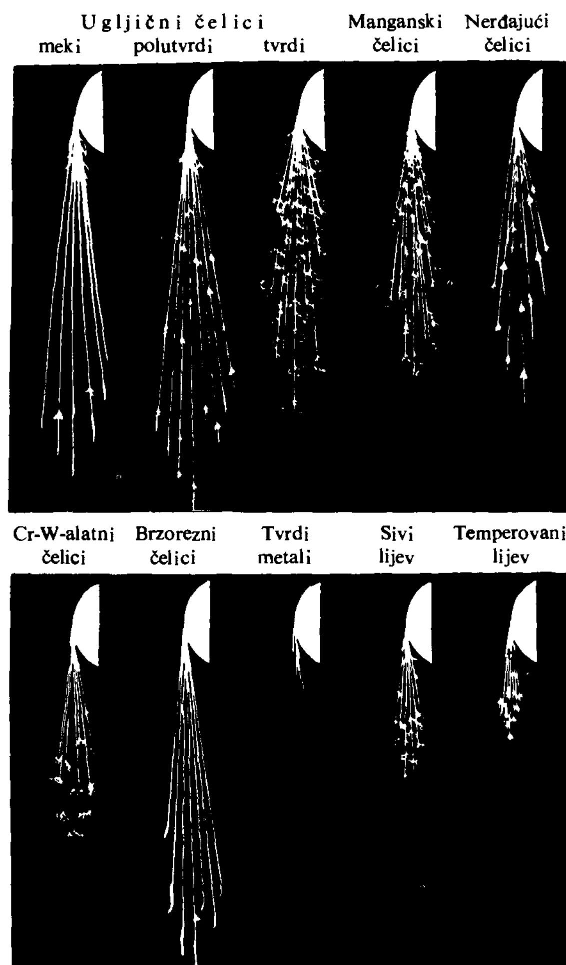
Ugljični konstrukcijski čelici se mogu po iskrama razlikovati za svakih 0,1 % C. Meki čelici daju snop iskara u obliku buzdovana s rijetkim zvjezdicama. S porastom količine C množe se i za nj karakteristične zvjezdice. Cr, Ni i W u čeliku smanjuju broj zvjezdica unatoč prisutnosti C. Cr se u čeliku razaznaje po žutocrvenim iskrama, W po njihovoj tamnocrvenoj boji (brzorezni čelici!). Tvrdi metali imaju vrlo kratke iskre tamnocrvene boje, bez zvjezdica.

Raspoznavanje čelika i srodnih kovina po brusnim iskrama zahtijeva veliko iskustvo. Za olakšanje raspoznavanja služe komadi za uspoređivanje točno poznate vrste čelika.

Ispitivanje iskrenjem ne možemo primjeniti na neželjezne kovine i slitine.

Za ispitivanje iskrenjem upotrebljavamo polutvrdu brusnu ploču veličine zrna 60 ... 80 pri brzini brušenja 20 ... 35 m/s.

Slike iskara pri brušenju



Metalografski pregledi

Makroskopski pregled (pri povećanju do npr. 20 puta) otkriva šupljine, mjehure, pukotine, trosku, pogreške u valjanju itd.

Mikroskopski pregled (pri povećanju do 1000 puta i više) otkriva strukturu (raspored, oblik i veličinu kristalnih zrna), koja je ovisna o kemijskom sastavu i uvjetima skrućivanja te o naknadnoj obradi materijala (toploj i hladnoj).

Da bi struktura postala vidljivom, moramo površinu pokusnog predmeta izbrusiti smirkom, i to uvijek finijim, te konačno najfinije polirati. Za otkrivanje pojedinih sastavina strukture mora se polirana površina jetkati. Sredstva za jetkanje ovise o vrsti materijala i svrsi pregleda.

Najuobičajenija sredstva za jetkanje pri metalografskim ispitivanjima su:

za čelik

— za nelegirane i legirane čelike: 2%-tna (za posebne slučajeve 4%-tna) alkoholna dušična kiselina;

— za nerđajuće kromne čelike: alkoholna solna kiselina;

— za austenitne čelike: alkoholna zlatotopka (carska vodica) sastava: 8 cm^3 dušične kiseline (1,40), 12 cm^3 solne kiseline (1,19) i 1000 cm^3 alkohola ili pak američko sredstvo: 7...8 cm^3 koncentrirane dušične kiseline, 2...3 cm^3 koncentrirane solne kiseline i 0,5 g bakrenog klorida $CuCl_2$ (to se sredstvo može samo kratkotrajno održati);

— za otkrivanje fosfornih segregata: Oberhofferovo sredstvo — 0,5 g kositrenog klorida $SnCl_2$, 1,0 g bakrenog klorida $CuCl_2$, 30 g željeznog klorida $FeCl_3$, 30 cm^3 solne kiseline (1,19), 500 cm^3 destilirane vode i 500 cm^3 alkohola;

— za otkrivanje sumpornih segregata — Baumannov postupak: fotografski se papir (srebrni bromid) stavi kratko vrijeme u 5%-tnu sumpornu kiselinu, a zatim na staklenu ploču sa slojem prema gore. Na sloj pritiskujemo pomno očišćenu brušenu plohu ispitivanog dijela 1 do 10 min, a potom papir kratko isperemo vodom i konačno fiksiramo u normalnoj fiksirnoj kupelji ($Na_2S_2O_3$);

za bakar i bakrene slitine

— za bakar i α-mjed: 10 g amonijeva persulfata otopljenog u 100 cm^3 vode (otopina mora biti uvijek svježe pripremljena);

— za bakar, α-β-mjed i broncu: amonijačna otopina bakrenog klorida (10 g bakrenog amonijeva klorida otopi se u 120 cm^3 destilirane vode i doda toliko otopine amonijaka da se prije nastali talog upravo otopi);

za olovo i olovne slitine

— otopina od 16 (ili 8) cm^3 dušične kiseline (1,40), 16 (ili 8) cm^3 octene kiseline i 68 (ili 84) cm^3 glicerina;

za aluminij i aluminijske slitine

— najprije 1 g natrijeve lužine u 100 cm^3 vode, zatim 5%-tna dušična kiselina;

za magnezij i magnezijske slitine

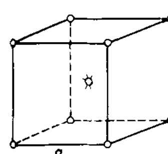
— razrijeđena alkoholna dušična kiselina.

KOVINSKI MATERIJALI

Kristalna struktura kovina

Sve kovine u krutom stanju imaju kristalnu strukturu. Njeni najčešći oblici su (mjere u nm):

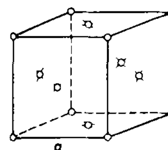
Kubna prostorno centrirana rešetka



Kovina	Dimenzija a	Promjer atoma d
Fe_α	0,286	0,248
Cr	0,288	0,250
V	0,303	0,262
Mo	0,314	0,272
W	0,316	0,274

Također: Fe_δ, Ti_β, Rb, Nb, Ba, Ta

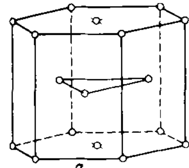
Kubna plošno centrirana rešetka



Kovina	Dimenzija a	Promjer atoma d
Fe_γ	0,356	0,252
Ni	0,352	0,248
Cu	0,362	0,256
Al	0,405	0,286
Pb	0,495	0,350

Također: Co_β, Sr, Rh, Pd, Ce, Ag, Au, Pt, Ir

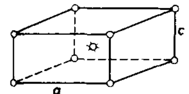
Heksagonalna rešetka



Kovina	Dimenzija a	Dimenzija c	Promjer atoma d
Co_α	0,251	0,407	0,250
Ti_α	0,295	0,473	0,292
Zn	0,266	0,294	0,260
Mg	0,320	0,520	0,320

Također: Zr, Tc, Ru, Cd, Gd, Re, Os, Tl

Tetragonalna rešetka



Kovina	Dimenzija a	Dimenzija c	Promjer atoma d
Sn	0,583	0,318	0,302

As, Sb, Te i Bi imaju kompleksnu kristalnu strukturu.

Neke se kovine mogu pojaviti u više kristalnih oblika – *modifikacija* (polimorfizam). Promjena modifikacije – *pretvorba* – javlja se pri određenoj temperaturi, npr.

$Fe_\alpha - Fe_\gamma$: 910 °C $Co_\alpha - Co_\beta$: 420 °C
$Fe_\gamma - Fe_\delta$: 1390 °C $Ti_\alpha - Ti_\beta$: 882 °C

Mn i In kristaliziraju kubno i ortorombno.

Slitine (legure)

S l i t i n e su sastavljene od najmanje dviju komponenata od kojih je barem jedna kovina, dok je druga kovina, nekovina ili spoj. Legiranjem postižemo mnoga mehanička i druga fizikalna svojstva koja čiste kovine nemaju.

Slitinama nazivamo samo takve kovinske materijale kod kojih nekoj kovini n a m j e r n o dodajemo druge (kovinske ili nekovinske) komponente.

Kovinske materijale koji sadrže n e n a m j e r n o dodane (npr. pri dobivanju) druge komponente, uglavnom u malim količinama, ubrajamo u nečistoće.

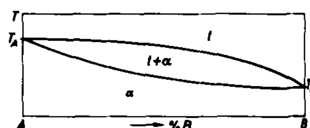
Slitine nastaju od komponenata koje se u tekućem stanju — taljevini — međusobno otapaju. Komponente koje se međusobno otapaju i u krutom stanju stvaraju *kristale mješance*, i to u slučaju potpune topivosti u svim omjerima (koncentracijama) sastavina, a u slučaju djelomične topivosti samo do određenog sastava — zasićenja. Slitine takva sastava koji prelazi granicu zasićenja (otopinska praznina) mogu se sastojati samo od smjese kristala mješanaca. Mnoge slitine tvore (pri najnižoj temperaturi skrućivanja) osobito sitnozrnatu smjesu kristala mješanaca — *eutektik*.

Binarni sistemi slitina (sistemi slitina s dvjema komponentama)

Binarne (dvojne) sisteme slitina prikazujemo faznim dijagramima temperatura—sastav. U slijedećim dijagramima osnovnih binarnih sistema znače: t — taljevinu, A i B — komponente slitine, α i β — kristale mješance (otopine B u kristalnoj rešetki A, odn. A u rešetki B), E — eutektik.

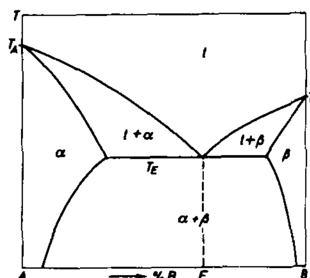
Sistem potpune topivosti

Komponente A i B otapaju se međusobno u krutom stanju u svim mogućim omjerima sastavina. Slitina je sastavljena od samih homogenih kristala mješanaca (α).



Sistem djelomične topivosti

Komponente A i B otapaju se jedna u drugoj samo do određenog sastava (zasićenja). Slitina se do tog sastava sastoji od homogenih kristala mješanaca (α in β), a inače od heterogene smjese kristala (α, β i E). Eutektik E je sitnozrnata smjesa kristala α i β u točno određenom omjeru.



Potpune netopivosti nema, ali područja kristala mješanaca (α i β) mogu biti tako neznatna (sastav kristala mješanaca pri zasićenju gotovo je jednak čistoj kovini) da djelomičnu topivost možemo u tom slučaju zanemariti.

ŽELJEZO I NJEGOVE SLITINE

Čisto željezo

Pri zagrijavanju čistog željeza primjećujemo tri temperaturne (stojne) točke, u kojima određeno vrijeme zastaje porast temperature (zbog unutarnjih kristalnih promjena):

Stojište A_2 – 768 °C – (»Curiejeva temperatura«) označuje temperaturnu granicu do koje je željezo magnetično. Modifikaciju željeza do te granice nazivamo α (magnetično), a iznad te granice β (nemagnetično). Kristalna je struktura za obje modifikacije ista – kubna prostorno centrirana kristalna rešetka.

Točka pretvorbe A_3 – 910 °C – označuje promjenu kristalne strukture β u kubnu plošno centriranu rešetku, koju nazivamo modifikacijom γ (nemagnetična).

Točka pretvorbe A_4 – 1390 °C – označuje promjenu kristalne strukture γ u modifikaciju δ, strukturno identičnu modifikaciji β (nemagnetična).

Talište je čistog željeza na 1534 °C.

Čisto željezo u čvrstom stanju kristalizira prema tome u dva oblika:

a) kao željezo α – Fe_α (koje obuhvaća kristalno jednake modifikacije α, β i δ), koje je magnetično do 768 °C, nemagnetično između 768 i 910 °C te između 1390 i 1534 °C;

b) kao γ-željezo – Fe_γ između 910 i 1390 °C, nemagnetično.

U α-željezu otapa se samo vrlo malo ugljika, a u γ-željezu može se otopiti do 2,06% (pri 1147 °C).

Čisto je željezo pri temperaturi okoline (Fe_α) razmjerno veoma otporno prema koroziji, prilično je mekano (45 ... 55 HB), male je čvrstoće (180 ... 250 N/mm^2) i vrlo rastezljivo (50 ... 40%). Zbog male čvrstoće i skupog dobivanja (elektroliza!) njegova je primjena u tehnici neznatna. Najviše iskorišćujemo njegovu izvanrednu sposobnost za magnetiziranje.

Tehničko željezo

Tehničko željezo sadrži uvijek ugljik C i neznatne primjese, preostale u procesu proizvodnje – stalne pratioce mangan (Mn) i silicij (Si) te nečistoće fosfor (P) i sumpor (S).

Ugljik ima najveći utjecaj na nelegirano tehničko željezo; već u dijelovima postotka snažno utječe na njegova svojstva.

Pri ugrijavanju željeza, koje sadrži ma i neznatnu količinu ugljika, opažamo još i (stojnu) točku A_1 – 723 °C.

Prema sadržaju ugljika tehničko željezo dijelimo na:

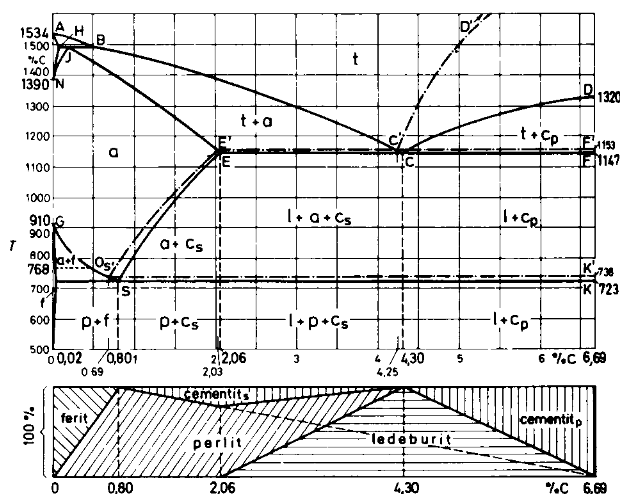
a) *čelik* sa C < 2,06%,

b) *lijevano željezo* sa C > 2,06%.

Legirane vrste tehničkog željeza sadrže još i druge elemente, koji su namjerno dodani radi postizanja određenih svojstava.

Sistem željezo-ugljik

Pune linije: *metastabilni sistem* Fe — Fe_3C (željezo-cementit)
Isprekidane linije: *stabilni sistem* Fe — C (željezo-grafit)



t — taljevina, a — austenit, f — ferit, c_p i c_s — primarni i sekundarni cementit, l — ledeburit, p — perlit

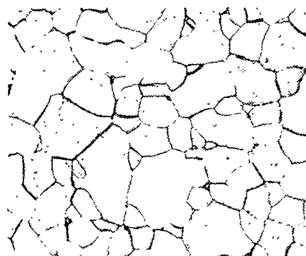
Strukturni sastojci u sistemu željezo-ugljik:

ferit je kristalni oblik α-željeza,
austenit je rastopinski kristal γ-željeza i ugljika (0 . . . 2,06% C)
cementit je kristalni oblik željeznog karbida Fe_3C (6,69% C)
ledeburit je eutektik u sistemu željezo-cementit (4,30% C)
perlit je eutektoid željeza i cementita (0,80% C)
grafit je kristalni oblik ugljika C.

Mehanička svojstva strukturnih sastavina (prosječne vrijednosti)

Sastavina	Čvrstoća (N/mm²)	Tvrdoća HV	Postot. produlj. (%)
ferit	250 . . . 300	90	35
austenit	750	210	60
cementit, ledeburit	–	850	–
perlit	700 . . . 900	220	10
grafit	20	–	–

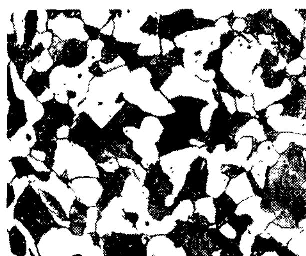
Strukture čelika



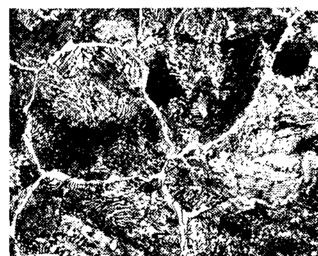
Ferit (500 : 1)



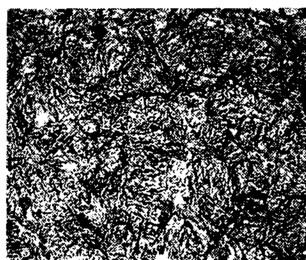
Perlit (500 : 1)



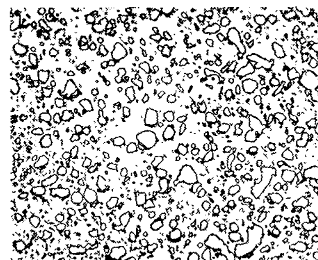
Ferit i perlit 0,35% C (500 : 1)



Perlit i cementit 1,1% C (500 : 1)



Martenzit (500 : 1)

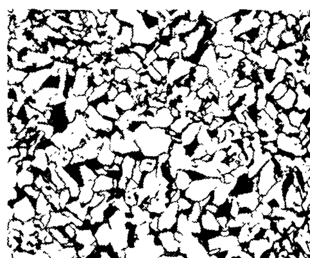


Zrnati cementit (500 : 1)

Strukture lijeva



Čelični lijev nakon lijevanja (100 : 1)



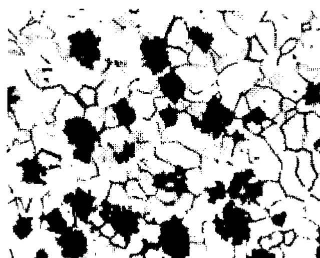
Čelični lijev normaliziran (100 : 1)



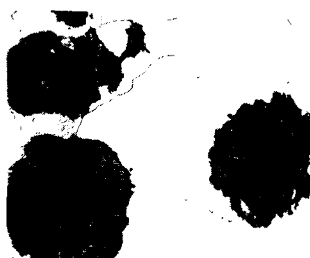
Bijeli lijev (200 : 1)



Sivi lijev (500 : 1)



Temperovani lijev — crni (100 : 1)



Sivi lijev — nodularni (500 : 1)

Skrućivanje po metastabilnom ili stabilnom sistemu željezo-ugljik

Čelici se sastoje od strukturnih sastavina metastabilnog sistema.

Lijevano se željezo sastoji od strukturnih sastavina obaju sistema: metastabilnog i stabilnog. Željezni karbid Fe_3C (cementit) u željeznom lijevu ima metastabilan karakter. On nastaje (bijeli lijev) pri skrućivanju taljevine sirovog željeza u okolnostima koje spriječavaju njegovo raspadanje, tj. pri razmjerno brzom ohlađivanju i u prisutnosti izvjesnih elemenata, osobito Mn (te Mo, V, Cr, S). Pri polaganom ohlađivanju (ili dužem žarenju) željezni se karbid raspada, a ugljik se izlučuje u obliku kristalnih zrna (listića) grafita. Taj raspad olakšava prisutnost nekih elemenata, osobito Si (te Al, Ni, Co, P).

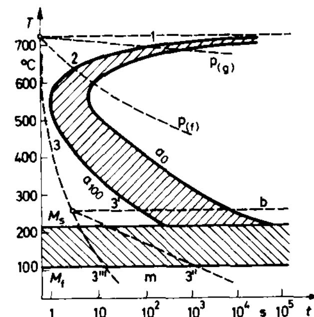
Pri potpunom izlučivanju ugljika osnovna se masa sastoji od ferita, u kojem zrna grafita sadrže sav ugljik (feritni sivi lijev). Pri djelomičnom izlučivanju ugljika osnovna se masa sastoji od perlita, koji sam sadrži dio ugljika, a samo se ostatak ugljika izlučuje kao grafit (perlitni sivi lijev).

Utjecaj brzine ohlađivanja austenita na strukturu čelika

α-željezo nema gotovo nikakvih sposobnosti za otapanje ugljika, dok ga γ-željezo može prilično dobro otapati, i to u obliku rastopinskih kristala austenita. Pri polaganom ohlađivanju raspada austenit pri perlitnoj temperaturi (723 °C) u perlit, a ugljik otprije otopljen u austenitu, izlučit će se i pojaviti u perlitnom cementitu. Sliku raspada pothlađenog austenita prikazuje Bainov dijagram (»TTT-diagram«*)

a_{100} — početak, a_0 — svršetak } raspada austenita

M_s — početak, M_f — svršetak } martenzitne pretvorbe



Austenit raspada pri polaganom ohlađivanju (1) u grubi perlit p_g, a pri bržem (2) u fini perlit p_f. Ohlađivanje velikom brzinom (3) spriječava u kritičnom temperaturnom području (≈ 550°C) raspad austenita pa se postiže područje nešto stabilnijeg pothlađenog austenita (≈ 250 °C), što omogućava izotermni raspad (3') u bainit (b), a manjom (3'') ili prvotnom (3''') brzinom ohlađivanja promjenu u martenzit (m).

Bainit je čvršći i tvrđi (50 . . . 60 *HRc*) od perlita.

Martenzit (prezasićeno α-željezo) je vrlo tvrd (≈ 66 *HRc*) sastojak zakaljenog čelika. Martenzit pri ugrijavanju iznad 200 °C raspada i prelazi postupno preko strukturnih oblika trustita i sorbita iznad 600 °C u zrnati cementit.

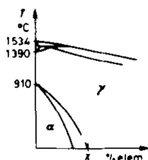
* *Time — Temperature — Transformation.*

Utjecaj elemenata na strukturu čelika

1. *Elementi koji proširuju austenitno područje*

U tu skupinu spadaju naročito Mn, Ni in Co. (Ugljik proširuje austenitno područje samo u ograničenom opsegu.)

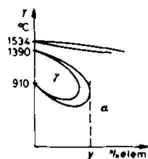
Austenitno se područje proširuje i postiže temperaturu okoline pri određenom sadržaju x (%) elementa, dodanog za legiranje. Slitine sa sadržajem dodanog elementa većim od x imaju, dakle, austenitnu strukturu postojanu i pri običnoj temperaturi. Takve čelike nazivamo »austenitnim čelicima«.



Značajna su svojstva austenitnih čelika da nisu magnetični; ne mogu se kaliti; čvrstoća i tvrdoća su im doduše razmjerno male, ali ti čelici pri većim deformacijama u hladnom neobično otvrdnu i postaju vrlo otporni prema habanju; otporni su prema koroziji.

2. *Elementi koji suzuju austenitno područje*

U tu skupinu spadaju Be, Al, Si, P, Ti, V, Cr, Mo, W.



Austenitno je područje suženo. Iznad stanovitog sastava γ, ni pri kojoj se temperaturi više ne pojavljuje austenit, već imamo na svim temperaturama samo α-strukturu – ferit. Takve čelike nazivamo »feritnim čelicima«.

Značajna su svojstva feritnih čelika da se ne mogu kaliti; naginju gruboj kristalizaciji; istezljivost u hladnom stanju manja je nego kod austenitnih čelika pa zato pri hladnom gnječenju i manje otvrdnu; otporni su prema koroziji.

3. *Elementi koji stvaraju karbide*

Neki elementi stvaraju neposredno sa C karbide. Pri tome su osobito važni Mn, Cr, W, Mo, V, Ti itd.

Karbidi tih kovina su značajni zbog tvrdoće i velikog utjecaja na polaganiju promjenu strukture čelika. Ugrijani do austenitnog područja otapaju se u njemu polagano. Sprečavaju rast kristala i time podupiru nastanak finozrnate strukture. Uz brzo ohlađivanje pri kaljenju se ti karbidi ne izlučuju, već ostaju otopljeni u martenzitu. Time smanjuju kritičnu brzinu hlađenja potrebnu za nastanak martenzita (što omogućuje kaljenje u ulju ili na zraku) te povisuju temperaturu postojanosti martenzita pri napuštanju, zadržavaju dakle raspad tvrde martenzitne strukture i na višim radnim temperaturama.

Čelici jako legirani s Cr in W koji sadrže višestruke karbide (»ledeburitni čelici«), vrlo su tvrdi i veoma otporni prema habanju, i to stoga što karbidi u isti mah sprečavaju raspadanje martenzita i zadržavaju tvrdoću (kaljenog) čelika i pri radu na višim temperaturama (brzorezni čelici).

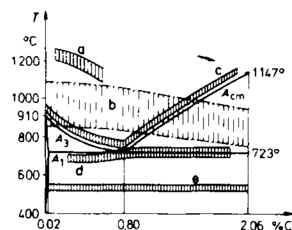
Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika

Svojstva čelika	Legirni elementi												
	C	S	P	Si	Mn	Al	Ni	Cr	Mo	W	V	Ti	Co
Čvrstoća	++		+	+	+	+	+	++	+	+	+	+	+
Tvrdoća	++			+	+	+	+	++	+	+	+	+	+
Postoino produljenje	—	—			++	——	+	+					—
Elastičnost	++		+	++	+		+	+	+		++		
Udarna žilavost	—	——	——	—	++	——	+		++		++	——	
Trajna statička čvrstoća (pri višim temperaturama)	+		+	+	+	+	+		++	++	+	+	+
Dinamička čvrstoća					+	—		+	++	++	++	++	+
Otpornost prema kem. utjecajima	—	——	++	+	+	+	++	++	+		+	+	+
Otpornost prema vatri	+			+	—	++		+	—		—		
Sposobnost za izvlačenje	——	—	——	——	—		——	—		—	——		
Sposobnost za kovanje	—	—	+	——									
Sposobnost za zavarivanje	—	—	—	—								+	
Sposobnost za obrađivanje	—	++	+	—	—	——	—	—		—	—	—	
Sposobnost za rezanje (alat)	++			+		+		+	+	+	++	+	+
Otpornost prema popuštanju								+	+	++	++	+	+

U tablici »+« znači utjecaj u smislu povećanja odgovarajućeg svojstva čelika, a »—« znači smanjivanje tog svojstva. Dvostruki znakovi znače pojačan utjecaj.

TOPLINSKA OBRADA ČELIKA

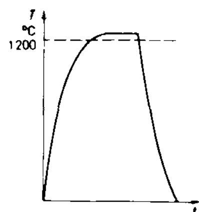
Žarenje čelika



Žarenje ugljičnog (nelegiranog) čelika
a) *difuzijsko žarenje*
b) *žarenje radi kovanja*
c) *normalizacija*
d) *žarenje radi omekšavanja*
e) *žarenje za odstranjivanje napetosti*

Žarenje čelika je postupak kojim čelik grijemo na određenoj temperaturi određeno vrijeme i zatim ga na odgovarajući način hladimo, da bismo time postigli željene strukturne promjene. Različitim postupcima pri žarenju postižemo izjednačenje kemijskog sastava i kristalne strukture, povećanje žilavosti, smanjenje veličine kristalnih zrna, povećanje mekoće čelika ili odstranjenje unutarnjih napetosti.

Pri žarenju čelika vrlo su važne temperature strukturnih promjena: A_3 (linija G–O–S u sistemu željezo-ugljik, vidi str. 344) – kao donja granica austenitnog područja, i A_1 (723 °C za ugljične čelike) – kao granica raspada austenita u perlit. Za legirane su čelike odgovarajuće temperature navedene u tablicama za čelik.



1. D i f u z i j s k o ž a r e n j e je dugotrajno žarenje čelika pri visokim temperaturama, a služi izjednačenju nejednolike strukture nastale pri lijevanju, koja otežava obradu i smanjuje vrijednost proizvoda. To se žarenje redovno izvodi već pri proizvodnji čelika.

Grubozrnata struktura nastala prilikom difuzijskog žarenja može se odstraniti gnječenjem u toplom stanju ili normalizacijom.

2. Ž a r e n j e radi toplog gnječenja (kovanja, prešanja, valjanja itd.)

Kristali čelika nastali iz taljevine primarnom kristalizacijom ili narasli difuzijskim žarenjem su grubozrnati. Oni mogu postati mnogo finijim gnječenjem u toplom stanju.

Pri pravilnom gnječenju mora materijal biti temeljito prognječen do srži. Gnječenje dopire dublje pri valjanju i prešanju nego pri kovanju. Zato je pažljivost pri žarenju za kovanje osobito važna.

3. N o r m a l i z i c i j a

Gruba struktura u čeličnim odljevcima, koji se zbog održanja oblika ne mogu gnječiti, i gruba struktura u velikim otkovcima, koji se kovanjem ne mogu do srži prognječiti, ostaje pri ohlađivanju ispod granice austenitnog područja A_3 u novoj, perlitno-feritnoj strukturi također grubozrnata. Tu strukturu možemo normalizacijom učiniti finijom.

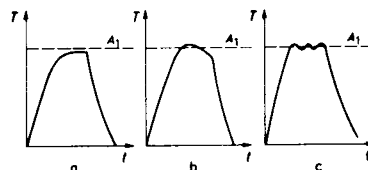
Tim se postupkom čelik zagrije za 30...50 °C iznad temperature pretvorbe A_3, i to kratko vrijeme – tek toliko da se struktura upravo promijeni opet u austenitnu. Pri toj se pretvorbi stvaraju novi fini austenitni kristali, koji se zatim pri normalnom ohlađivanju na zraku raspadaju u kristale ferita i perlita, a oni zadržavaju finu strukturu i pri temperaturi okoline.

Pri previsokoj temperaturi ili predugom grijanju u austenitnom području kristali bi opet narasli te bi korist normalizacije propala. Pregrijani se grubozrnati čelik može ispravno provedenom normalizacijom opet popraviti.

Normalizacijom se poboljšavaju svojstva čvrstoće.

4. Ž a r e n j e r a d i o m e k š a v a n j a

Stanovite vrste čelika žarimo da bismo dobili čelik u što mekšem stanju, prikladnom za mehaničku obradu. Ujedno je to stanje polazište za ispravno kaljenje bez opasnosti da se predmet izvitoperi ili popuca.



Mekše stanje postižemo:

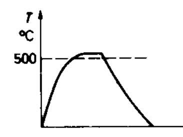
a) kod podeutektoidnih čelika duljim grijanjem predmeta (2...20 h) na temperaturi tik ispod perlitne temperature A_1, a zatim ohlađivanjem (pri čemu brzina ohlađivanja nije osobito važna, ali mora biti jednolika);

b) kod čelika oko eutektoidnog sastava jednolikim ugrijavanjem predmeta do perlitne temperature A_1, zatim polaganim ohlađivanjem na 600...650 °C (pri čemu brzina daljnjeg ohlađivanja nije osobito važna);

c) kod nadeutektoidnih čelika kolebanjem temperature oko perlitne temperature A_1.

5. Ž a r e n j e r a d i o d s t r a n j i v a n j a u n u t a r n j i h n a p e t o s t i

Nejednoliko ohlađivanje, obrada rezanjem, hladno gnječenje (kovanje, valjanje, izvlačenje) itd. izazivaju napetosti u predmetima. Zbog tih se napetosti predmeti vitopere pri ugrijavanju sve do temperatura na kojima se granica plastičnosti materijala snizuje ispod unutarnjeg naprezanja (oslobođena naprezanja izazivaju plastične deformacije).

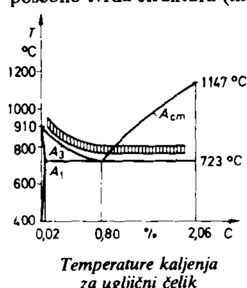


Unutarnja naprezanja u čeliku odstranjujemo žarenjem pri približno 500 (...600) °C i zatim polaganim ohlađivanjem predmeta.

Kaljenje čelika

1. Obično kaljenje

Kaljenjem nazivamo toplinsku obradu brzog ohlađivanja kaljivih čelika s određene temperature kaljenja (s područja austenita), pri čemu se stvara posebno tvrda struktura (martenzit).

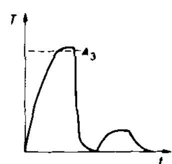


Temperature kaljenja za ugljični čelik

Temperature kaljenja treba za pojedine vrste čelika odabrati točno prema podacima u tablicama. Grijanje do tih temperatura treba da bude jednoliko i takvo da prodre kroz cijeli presjek.

Za dobivanje tvrde strukture kaljenja (martenzita) treba predmet ohlađivati s temperature kaljenja najmanje »kritičnom brzinom ohlađivanja«. Ugljični i neki malo legirani čelici imaju vrlo veliku kritičnu brzinu ohlađivanja, koju možemo postići samo hlađenjem u vodi. Srednje legirani čelici imaju takvu kritičnu brzinu ohlađivanja da je možemo postići u ulju, a za jako legirane čelike dovoljno je već ohlađivanje na zraku.

Pri brzom ohlađivanju pojavljuju se razlike u temperaturama na površini i u dubini predmeta, što – zbog različite temperaturne rastezljivosti – izaziva naprezanja i opasnost od pucanja. Zato nikada ne upotrebljavamo sredstva za hlađenje koja djeluju brže nego je to potrebno. Za izradu predmeta koje treba kaliti odabiremo po mogućnosti vrstu čelika koja ima manju kritičnu brzinu ohlađivanja pa se zato može kaliti u rashladnom sredstvu koje blaže djeluje.



Velika unutarnja naprezanja koja nastaju pri kaljenju ublažujemo popuštanjem ili napuštanjem, tj. ugrijavanjem do 180 °C (gdje čelik još ne gubi tvrdoću), i to neposredno nakon kaljenja (još prije nego se predmet potpuno ohladi do temperature okoline). U tu se svrhu preporučuju uljene ili solne kupelji (najmanje ½h).

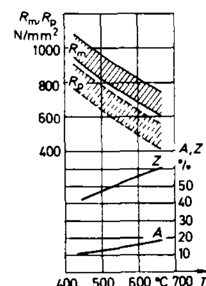
2. Posebni postupci pri kaljenju

a) *Prekidno kaljenje* upotrebljavamo za komplicirane predmete. Ohlađujemo ih najprije u sredstvu koje brže hladi, a kad se dovoljno ohlade (što osigurava nastanak martenzita), hladimo ih dalje u rashladnom sredstvu koje blaže djeluje i time smanjujemo naprezanje.

b) *Stupnjevito kaljenje* (termalno kaljenje) upotrebljavamo za komplicirane dijelove od legiranog čelika. Prvo hlađenje obavimo u solnoj ili kovinskoj kupelji pri temperaturi blizu nad martenzitnom. Time osiguravamo kasnije stvaranje martenzita. On nastaje pri daljnjem ohlađivanju koje možemo izvršiti na zraku (vidi krivulju 3″ u Bainovu dijagramu na str. 345).

3. Poboljšavanje

Svojstva čvrstoće čelika poboljšavamo posebnim postupkom koji se sastoji od običnog kaljenja i popuštanja pri višim temperaturama (do 680 °C), pri čemu martenzit raspada u finozrnate međustrukture (trustit, sorbit) do zrnatog cementita. Izborom temperature popuštanja možemo postići sva željena svojstva čvrstoće između zakaljenog i meko žarenog stanja.



Primjer poboljšavanja čelika
R_m = *čvrstoća*
$R_{p0,2}$ = *naprezanje tečenja*
A = *postotno produlj.*
Z = *kontrakcija*

Posebnim postupkom poboljšavanja ohlađujemo predmet s temperature kaljenja neposredno u solnoj i kovinskoj kupelji na temperaturi poboljšavanja i zatim ga ostavljamo duže vrijeme na toj temperaturi (»izotermno poboljšavanje«, vidi krivulju 3′ u Bainovu dijagramu na str. 345). Na taj način nastaje razmjerno žilava struktura (bainit).

4. Površinsko kaljenje

Grijanjem posebnim načinom kojim vrlo brzo ugrijavamo površinu predmeta do temperature kaljenja i neposredno zatim ohlađivanjem (dok su dublji slojevi još hladni) zakalimo samo površinski sloj. Time postižemo tvrdu površinu, a jezgra ostaje žilava. Potrebno brzo ugrijavanje površine možemo postići:

a) *potapanjem predmeta* u solnu kupelj na temperaturi mnogo iznad temperature kaljenja,

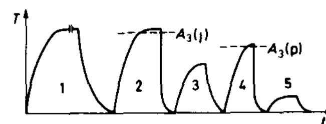
b) *plamenom* acetilena i kisika,

c) *visokofrekventnom strujom*, koja zbog unutarnje indukcije ugrijava samo površinu (skin-efekt), i to sloj toliko tanji koliko je viša frekvencija.

5. Cementiranje (ugljičenje)

Da bismo dobili na žilavom (mekom) čeliku osobito tvrdu površinu, upotrebljavamo cementiranje, tj. žarenje pri 870 ... 930 °C u sredstvu za cementiranje, koje može biti kruto (drveni ugljen s dodatkom $BaCO_3$), tekuće (specijalne solne kupelji na bazi NaCN) ili plinovito (CO). Cementiranje traje u krutom sredstvu 4 ... 10 h za cementirani sloj dubine oko 1,2 ... 1,6 mm koji sadrži oko 1 % C. U tekućem ili plinovitom sredstvu cementiranje je znatno kraće.

Nakon cementiranja treba predmet toplinski obraditi, i to nakon cementiranja (1) ga ohladimo i zatim kalimo najprije pri temperaturi kaljenja za meki čelik (2), a onda još pri temperaturi kaljenja za pougljičeni površinski sloj (4). Između oba kaljenja može biti uključeno još i međužarenje (3). Na kraju predmet popuštamo (5) pri najviše 180 °C.



6. Nitriranje

Specijalne čelike za nitriranje zagrijavamo 10 . . . 100 h u struji amonijaka (NH_3) pri 500 °C. Time dobivamo 0,3 . . . 1,0 mm debeo, prirodno tvrd površinski sloj tvrdoće 900 . . . 1100 HV (koja se naglo smanjuje prema jezgri predmeta).

Cijaniranje je nitriranje u posebnoj solnoj kupelji (na bazi NaCN), u kojoj pri 500 . . . 530 °C u toku 1 . . . 3 h dobivamo nitrirani sloj dubok 0,125 mm tvrdoće 1100 HV.

Opće upute za toplinsku obradu čelika

1. Zagrijavanje

Čelik se pri zagrijavanju rasteže. Naglo je zagrijavanje uzrok nejednolike temperature različitih dijelova predmeta, koji obrađujemo (tanji se i šiljasti dijelovi i rubovi brže ugriju do viših temperatura), što može izazvati jake unutarnje napetosti. Ako je materijal razmjerno žilav, napetosti se ublažuju plastičnom deformacijom i izvijanjem odn. vitoperenjem predmeta (predmet se »baca«), dok se kod tvrđeg materijala pojavljuju pukotine. One se pojavljuju to više što je čelik više legiran, jer je toplinska vodljivost pri jačem legiranju manja.

Zato čelik treba zagrijavati to opreznije, što je više sklon pucanju. Tvrde i legirane čelike, osobito alatne, moramo zagrijavati polako od temperature okoline do 400 . . . 500 °C. Odatle dalje čelik postaje mekaniji pa ga zato možemo i brže zagrijavati.

2. Temperatura zagrijavanja

Da bismo postigli što bolje rezultate toplinske obrade, potrebno je što je moguće točnije postići temperaturu, određenu za pojedini postupak.

Točno možemo temperaturu odrediti samo različitim mjerilima temperature.

a) Živini termometri se mogu upotrijebiti do 500 °C (iznad 350 °C u specijalnoj izvedbi — punjeni s N_2 ili CO_2 pod tlakom).

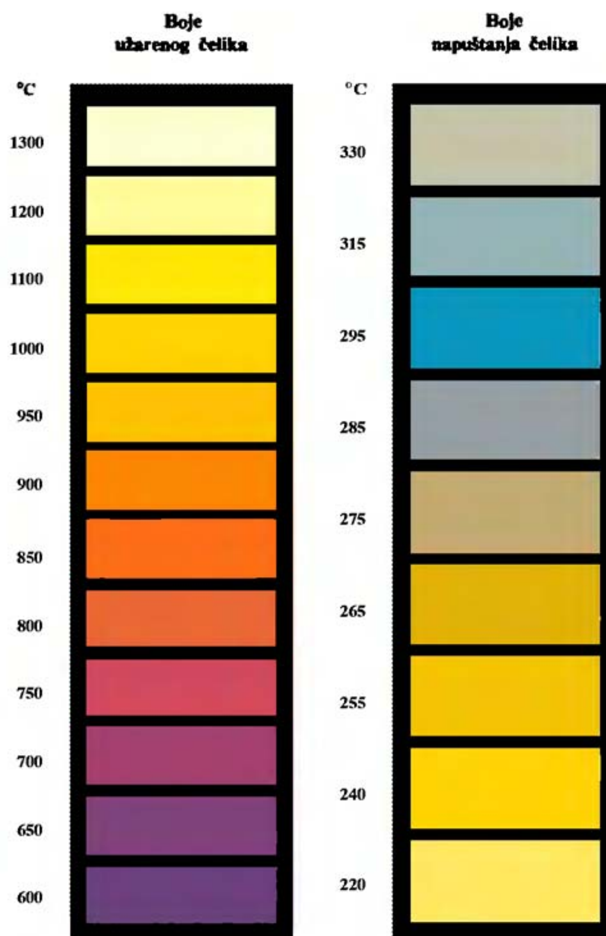
b) Termoelementi za različita temperaturna područja:

Cu — konstantan	do 400 °C	Ni — NiCr (9% Cr)	do 1000 °C
Fe — konstantan	do 800 °C	Pt — PtRh (10% Rh)	do 1500 °C

c) Optički termometri (pirometri) upotrebljivi su iznad 600 °C do najviših temperatura.

Osim navedenih instrumenata za mjerenje temperature, koji su neophodni za predmete s većim zahtjevima, možemo za jednostavnije predmete i s manjim zahtjevima ocijeniti temperaturu po boji užarenog čelika (vidi skalu boja užarenog čelika!).

Isto se tako u praksi često ocjenjuju temperature čelika pri popuštanju odn. poslije popuštanja u temperaturnom području od 200 do 350 °C po oksidacijskim bojama (vidi ljestvicu boja pri popuštanju čelika!). Boje koje odgovaraju pojedinim temperaturama popuštanja vrijede doduše za većinu čelika, no ne vrijede za nerđajuće čelike, kod kojih su temperature što pripadaju pojedinim bojama znatno više.



3. Trajanje grijanja

Za toplinsku je obradu veoma važno i trajanje grijanja predmeta na određenoj temperaturi. To ovisi o debljini stijenki predmeta, njegovoj toplinskoj vodljivosti i o sredstvu u kojem predmet grijemo.

Ako je grijanje prekratko, nutrina se debljih predmeta ne ugrije do potrebne temperature, zbog čega tada može izostati uvjet za tok određenog procesa toplinske obrade. Ako je pak grijanje predugo, može se pojaviti grubozrnata struktura i smanjivanje količine ugljika u čeliku.

4. Sredstva za zagrijavanje

Ako zagrijavamo predmete samo pri nižim temperaturama do 180 °C (npr. za popuštanje), redovito upotrebljavamo mineralna ulja.

Ako temperatura mora biti visoka, ugrijavamo predmete većinom u žarnim pećima. U njima su izvrgnuti oksidacijskom djelovanju kisika iz zraka. Otuda i gubici materijala zbog izgaranja. Oni su veći u električno grijanim komornim pećima nego u pećima na plin ili naftu.

Oksidacijskom utjecaju atmosfere pri visokim temperaturama najbolje izbjegavamo zagrijavanjem u kupeljima. Najčešće upotrebljavamo:

solne kupelji:		za 770 ... 1000 °C	3 dijela $BaCl_2$
za 250 ... 600 °C	1 dio KNO_3		2 dijela KCl
	1 dio $NaNO_3$	iznad 1000 °C	$BaCl_2$
za 600 ... 770 °C	1 dio NaCl	*kovinske kupelji*	
	1 dio KCl	za 250 ... 550 °C	2 dijela Pb
	1 dio $BaCl_2$		3 dijela Sn
	2 dijela $CaCl_2$	za 550 ... 900 °C	Pb

Zagrijavanje u kupeljima je brže od zagrijavanja u žarnim pećima. Zato su temperaturne napetosti pri zagrijavanju u kupeljima veće, što pri nižim temperaturama (manja žilavost obrađivanih predmeta) povećava opasnost od vitoperenja i pucanja.

5. Sredstva za hlađenje

Za gašenje (brzo ohlađivanje s visokih temperatura) upotrebljavamo — već prema potrebnoj brzini ohlađivanja (vrsta čelika!) — vodu, ulje ili zrak.

Pri gašenju u vodi kaljenje veoma ovisi o temperaturi i gibanju vode. Potrebno je jako miješanje ili mlaz vode da bi se odstranili nastali mjehuri pare, koji sprečavaju prijelaz topline. (Rashladno se djelovanje vode znatno povećava, ako vodi dodamo natrijeve lužine — NaOH.)

Pri gašenju u ulju (repičnom ili mineralnom) temperatura ulja u području od 40 do 70 °C nema znatnijeg utjecaja na brzinu hlađenja. Važna je viskoznost ulja, koja pri 20 °C treba da iznosi oko 16 (... 50) mm^2/s.

Pri hlađenju zrakom upotrebljavamo zračni mlaz, koji mora biti potpuno suh, ili pak predmet naprosto hladimo na zraku. Pri osobito sporom hlađenju ukopamo predmet u pepeo ili ga ostavimo u peći da se zajedno s njom ohladi.

LIJEVANO ŽELJEZO

Lijevano željezo dobivamo lijevanjem sirovog željeza (C > 2,06%). Količina ugljika C iznosi obično 2,5 ... 3,5%, a razlikujemo:

a) s i v i l i j e v , u kojemu je ugljik sav ili veći dio po cijelom presjeku izlučen kao grafit (C);

b) t v r d i (b i j e l i) l i j e v , u kojem je ugljik po cijelom presjeku ili određenom dijelu presjeka potpuno vezan kao željezni karbid (Fe_3C).

Lijevano željezo sadrži redovno osim ugljika još i manje količine drugih primjesa: Si, Mn, P i S.

Sivi lijev

N o r m a l n e vrste sivog lijeva s ljuskastim grafitom (ISO) (JUS C.J2.020 – 1973)

Nelegirani i malo legirani sivi lijev

Oznaka	Promjer neobrađenog ispitnog uzorka* mm	Vlačni poskus: promjer obrađenog ispitnog uzorka mm	Vlačni poskus: vlačna čvrstoća R_m (min.) N/mm²	Pokus savijanja: razmak simetrala oslonaca (min.) mm	Pokus savijanja: čvrstoća** na savijanje (min.) N/mm²	Gustoća kg/m³
SL 10	**30**	**20**	**100**	–	–	7200
SL 15	13	8	230	260	340	
	20	12,5	180	400	320	
	20	**20**	**150**	**600**	**300**	
	45	32	110	900	270	
SL 20	13	8	280	260	410	
	20	12,5	230	400	390	
	30	**20**	**200**	**600**	**360**	
	45	32	160	900	330	
SL 25	13	8	330	–	–	7350
	20	12,5	280	400	460	
	30	**20**	**250**	**600**	**420**	
	45	32	210	900	390	
SL 30	20	12,5	330	–	–	
	30	**20**	**300**	**600**	**480**	
	45	32	260	900	450	
SL 35	20	12,5	380	–	–	
	30	**20**	**350**	**600**	**540**	
	45	32	310	900	510	
SL 40	**30**	**20**	**400**	**600**	**600**	
	45	32	360	900	570	

* Standardni je ispitni uzorak izrađen od posebno odlivenog uzorka debljine 30 mm.
** Čvrstoća na savijanje odnose se na neobrađene ispitne uzorke.

Sivi lijev posebnih magnetskih svojstava

Oznaka	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Magnetska indukcija B u magnetskom polju H: H = 1250	2500	5000	10000 A/m
ESL 10	100	B = 0,40	0,60	0,80	0,95 T

K v a l i t e t n i s i v i l i j e v ima manje ugljika, manje grafitne ljuske i bolju osnovnu strukturu, što postižemo promjenom sastava, postupkom taljenja (višom temperaturom pregrijavanja) i cijepljenjem – modificiranjem (cjepivima: ferosilicijem, silikokalcijem Al, CaC_2 i dr., koja djeluju kao umjetne klice i pospješuju sitnozrnato izlučivanje grafita). Cijepljenjem postižemo čvrstoće od 300 ... 400 N/mm² (modificirani lijev).

S i v i l i j e v s k u g l a s t i m g r a f i t o m dobivamo dodatkom Mg (Ce, Ca), koji dezoksidira taljevinu, i cjepiva na bazi Si, koje unosi u taljevinu klice: izlučuje se kuglasti grafit (nodularni ili sferoidni ili duktilni sivi lijev itd.).

Nodularni lijev (JUS C.J2.022 – 1974)

Oznaka	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ N/mm² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm² min.	Postot. produlj. A_5 % min.	Tvrdoća HB	Zrnatost
NL 38	240	380	17	140 ... 180	feritna
NL 42	280	420	12	150 ... 200	pretežno feritna
NL 50	350	500	7	170 ... 240	feritno-perlitna
NL 60	400	600	2	190 ... 290	perlitno-feritna
NL 70	450	700	2	210 ... 300	perlitna

Udarna žilavost nodularnog lijeva NL 38 iznosi: KV = 12 J.

L e g i r a n i s i v i l i j e v je:

a) otporan prema habanju – s manjim dodacima (do ≈ 2,5%) Si, Cr, Ni, Mo;

b) austenitni – otporan prema oksidaciji na visokim temperaturama i prema koroziji – s velikim dodatkom Ni (12 ... 36%) i nešto Si, Mn, Cr, Cu.

Austenitni sivi lijev može sadržavati ljuskasti grafit (R_m = 140 ... 180 N/mm²) ili kuglasti grafit (R_m = 380 ... 420 N/mm²).

Tvrdi lijev

L i j e v s t v r d o m k o r o m ima ugljik u jezgri izlučen kao grafit, a u površinskom sloju (kori) vezan kao željezni karbid. Upotrebljava se za valjke i dijelove, izvrgnute habanju.

B i j e l i l i j e v sadrži ugljik po cijelom presjeku vezan kao željezni karbid, a upotrebljava se za mlinske kugle, mlaznice za štrcanje pijeska i sl.

Temperovani lijev (JUS C.J2.021 - 1958)

Temperovani lijev dobivamo od bijelog lijevanog željeza temperovanjem. *Bijeli temperovani lijev* ima nakon žarenja u oksidacijskoj atmosferi bijeli prijelom (zbog oksidacije ugljika).

Crni temperovani lijev ima nakon žarenja u neutralnoj atmosferi crni prijelom (zbog ugljika izlučenog u obliku grafita).

Bijeli temperovani lijev

Oznaka	Debljina mm	Promjer ispitnog uzorka mm	Vlačna čvrstoća R_m N/mm^2	Postot. produlj. A_5 %	Brinellova tvrdoća HB
B Te L 00	–	–	–	–	250
B Te L 35	4 .. 9 9)... 13 13)... 18 18)... 30	9 12 15 18	340	5 3 3 2	200
B Te L 40	4 ... 9 9)... 13 13)... 18 18)... 30	9 12 15 18	380	10 5 3 3	200

Crni temperovani lijev

Oznaka	Debljina mm	Promjer ispitnog uzorka mm	Vlačna čvrstoća R_m N/mm^2	Postot. produlj. A_5 %	Brinellova tvrdoća HB
C Te L 35*	4 ... 9 9)... 13 13)... 18 18)... 40	9 12 15 18	330	8	150
C Te L 38*	4 ... 9 9)... 13 13)... 18 18)... 40	9 12 15 18	370	12	140
C Te L 45**	4 ... 9 9)... 13 13)... 18 18)... 40	9 12 15 18	400	5	250

* Feritni lijev. – ** Perlitni lijev.

Magnetska svojstva temperovanog lijeva

Temperovani lijev	Magnetska indikcija B u magnetskom polju H		
	H = 2500	5000	10000 A/m
bijeli	B = 1,00	1,10	1,20T
crni	B = 1,15	1,25	1,35T

VRSTE ČELIKA

Čelici su kovke slitine željeza s ugljikom — do 2,06% C — ili i s drugim elementima. Pri većem sadržaju dodanih elemenata za legiranje može sadržaj ugljika biti i nešto veći od 2,06%.

Sve vrste čelika sadrže — iz procesa proizvodnje — još i manje količine Mn, Si, P i S. Čelike koji sadrže Mn < 0,8% i Si < 0,6% još ne smatramo legiranim. Sadržaj P i S gotovo je uvijek nepoželjan.

Razdioba čelika

1. Prema postupku proizvodnje:
   a) *obični čelici* dobivaju se većinom iz Siemens-Martinovih peći (»SM čelici«) ili iz konvertera (Bessemerovih ili Thomasovih); obični čelici su nelegirani (ugljični) ili malo legirani, a upotrebljavamo ih redovno bez toplinske obrade;
   b) *plemeniti čelici* dobivaju se rafinacijom ili rafinacijom i legiranjem u električnim pećima (»elektročelici«). Plemeniti se čelici redovno toplinski obrađuju.
2. Prema sadržaju:
   a) *ugljični čelici* su one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika ima ugljik, a drugih elemenata ima samo u količinama koje nemaju bitnog utjecaja, tj.

Mn < 0,80%,	Cr < 0,20%,	Co < 0,05%
Si < 0,60%,	W < 0,10%,	Ti < 0,05%
Ni < 0,30%,	Mo < 0,05%,	Al < 0,05%
Cu < 0,30%,	V < 0,05%,	

   b) *legirani čelici* su one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika imaju legirni elementi (tj. oni koji se namjerno dodaju da bi se postigla određena svojstva); malo legirani čelici imaju do 5% dodanih elemenata, a jako legirani više od 5%.
3. Prema upotrebi:
   a) *konstrukcijski čelici* su ugljični čelici (obični ili plemeniti) sa sadržajem C < 0,6% ili legirani (uglavnom sa Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V itd.). Upotrebljavamo ih za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja. Razlikujemo:
      — obične (ugljične ili malo legirane) čelike za opće svrhe (masovna upotreba),
      — plemenite (rafinirane) ugljične ili legirane čelike za dijelove s većim zahtjevima (dijelove strojeva itd.);
   b) *alatni čelici* su plemeniti ugljični čelici sa sadržajem C > 0,6% (< 2,06%) ili legirani (uglavnom sa Cr, W, V, Mo, Co itd.). Upotrebljavamo ih za izradu alata.

Označivanje vrsta čelika prema JUS (JUS C.B0.002 – 1986)*

Oznaka čelika sastoji se od tri dijela: Č. XXXX. X

- slovnog simbola Č
- osnovne oznake od četiriju ili petero brojčanih simbola
- dodatne oznake od jednoga ili više slovčanih ili brojčanih simbola
- drugih dodatnih oznaka

O s n o v n a o z n a k a označuje vrstu čelika:

1. *Čelici s negarantiranim sastavom*

Simbol na 1. mjestu : 0

Simbol na 2. mjestu označuje grupu minimalne vlačne čvrstoće:

Simbol	Čvrstoća N/mm²	Simbol	Čvrstoća N/mm²
0	–	5	490...580
1	...320	6	590...680
2	330...350	7	690...780
3	360...380	8	790...880
4	390...480	9	890...

Simbol na 3. i 4. (i 5.) mjestu označuje redni broj čelika:

0...44 – ugljični čelici s negarantiranom čistoćom
45...79 – ugljični čelici s ograničenim udjelom nečistoća
80...99 – ugljični čelici s ograničenim udjelom S i P te propisanim udjelom C, Si i Mn.

2. *Ugljični i legirani čelici s garantiranim sastavom*

Simboli na 1. i 2. mjestu:

a) kod ugljičnih čelika
   - simbol na 1. mjestu: 1
   - simbol na 2. mjestu: deseterostruka vrijednost maksimalnog postotka ugljika zaokružena na desetine: brojčani simbol za C = 0,9% jest 9;

b) kod legiranih čelika
   - simbol na 1. mjestu: oznaka najutjecajnijeg legirnog elementa
   - simbol na 2. mjestu: oznaka drugog (po redu) legirnog elementa; za jednostruko legirane čelike brojčani je simbol 1.

Element:	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	drugi
Oznaka:	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Pod najutjecajnijim legirnim elementom razumijeva se onaj kojemu pripada najveći umnožak sadržaja u čeliku (%) i faktora vrijednosti:

Element	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al	drugi
Faktor vrijednosti	1	1	4	4	7	14	17	20	30	1	1	30

Ako višestruko legirani čelici imaju više legirnih elemenata s istim umnoškom, smatrat će se najutjecajnijim elementom onaj kojemu oznaka ima viši broj.

* Osim ovog standarda čelici se po JUS-u označuju posebnim oznakama (npr. ČRV, ČRN, ČRO, MT, MD itd.)

Simboli na 3. i 4. (i 5.) mjestu označuju redni broj čelika:

0... 9 (101...199) – čelici koji nisu namijenjeni toplinskoj obradi,
20...29 (201...299) – čelici za cementiranje,
30...39 (301...399) – čelici za poboljšavanje,
40...59 (401...599) – ugljični i malo legirani alatni čelici,
60...69 (601...699) – čelici s posebnim fizikalnim svojstvima,
70...79 (701...799) – kemijski otporni i vatrostalni čelici,
80...89 (801...899) – brzorezni čelici,
90...99 (901...999) – čelici za automate.

D o d a t n a o z n a k a označuje stanje čelika:

0 – bez određene toplinske obrade,
1 – žaren,
2 – žaren do najbolje obradivosti,
3 – normaliziran,
4 – poboljšan,
5 – hladno preoblikovan,
6 – ljušten,
7 – brušen
8 – kontrolirano hlađen
9 – obrađen po posebnim uputama.

Dodatne su oznake još: 2A, 2B, 2C, 2D, 8A, 8B, K, H, S, V, Z.

Ta se oznaka upotrebljava samo za poluproizvode, i to samo u dokumentaciji u vezi s dobavom. Ne odnosi se na gotove ugrađene dijelove i ne unosi se u crteže.

P o s e b n e o z n a k e mogu se dodati u pojedinačnim slučajevima

Označivanje čelika u skladištima bojom
(JUS C.B0.003 – 1957)

Oznaka čelika bojom sastoji se od dva dijela, i to:

- od osnovne oznake koju čine četiri trake, a dobiva se zamjenom brojčanih simbola osnovne brojčane oznake čelika odgovarajućom bojom,
- od dodatne oznake koju čine jedna ili dvije trake, a dobiva se zamjenom brojčanih simbola dodatne brojčane oznake čelika odgovarajućom bojom.

Brojčani simboli	Boja trake	Brojčani simboli	Boja trake
0	crna	5	zelena
1	bijela	6	modra
2	crvena	7	ljubičasta
3	narančasta	8	smeđa
4	žuta	9	siva

Širina obojene trake treba da je prilagođena veličini proizvoda, no po mogućnosti treba upotrebljavati širine 5...16 mm. Neobojeni pojas između traka iznosi polovinu širine obojene trake, a između dijelova oznake za čelik – osnovne i dodatne – iznosi dvostruku širinu obojene trake.

KONSTRUKCIJSKI ČELIK

Opći konstrukcijski čelici (JUS C.B0.500 – 1970 i 1972)

Sastav (%)

Oznaka	Stanje	C ≈	P maks.	S maks.	N maks.
Č.0000	–	–	–	–	–
Č.0261	smireno	0,15	0,06	0,05	0,007
Č.0270	nesmireno	0,17	0,06	0,06	–
Č.0271	nesmireno	0,15	0,06	0,05	0,007
Č.0361	smireno	0,17	0,05	0,05	0,007
Č.0362	spec. smireno	0,17	0,045	0,045	0,009
Č.0363	spec. smireno	0,17	0,045	0,045	0,009
Č.0370	nesmireno	0,20	0,06	0,06	–
Č.0371	nesmireno	0,17	0,05	0,05	0,007
Č.0460	smireno	0,25	0,06	0,06	–
Č.0461	smireno	0,22	0,05	0,05	0,007
Č.0462	spec. smireno	0,22	0,045	0,045	0,007
Č.0463	spec. smireno	0,22	0,045	0,045	0,007
Č.0471	nesmireno	0,25	0,05	0,05	0,007
Č.0481	smireno	0,20	0,05	0,05	0,007
Č.0482	spec. smireno	0,20	0,045	0,045	0,009
Č.0483	spec. smireno	0,20	0,045	0,045	0,009
Č.0561	smireno	0,20	0,05	0,05	0,007
Č.0562	spec. smireno	0,20	0,045	0,045	0,009
Č.0563	spec. smireno	0,20	0,045	0,045	0,009
Č.0545	smireno	0,30	0,05	0,05	–
Č.0645	smireno	0,40	0,05	0,05	–
Č.0745	smireno	0,50	0,05	0,05	–

Toplinska obrada i upotreba

Oznaka	Kovanje °C	Normaliziranje °C	Upotreba
Č.0000	–	–	za sporedne svrhe
Č.0261, Č.0270, Č.0271 Č.0361, Č.0362, Č.0363 Č.0370, Č.0371,	1200 . . . 900	900 . . . 930	meki čelik
Č.0460, Č.0461, Č.0462 Č.0463 Č.0471 Č.0481, Č.0482, Č.0483	1150 . . . 900	850 . . . 880	polutvrdi čelik
Č.0561, Č.0562, Č.0563 Č.0545	1150 . . . 900	830 . . . 860	tvrdi čelik
Č.0645 Č.0745	1100 . . . 850	810 . . . 840 780 . . . 810	vrlo tvrdi čelik

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprezanje tečenja R_e N/mm² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. produlj. A_5 %	Pokus savijanja* (α = 180°)	Udarna žilavost *KV* J	Udarna žilavost *KV* °C
Č.0000	–	330 . . . 500	–	$D = 3a$	–	–
Č.0261 Č.0270, Č.0271	210	340 . . . 420	28	$D = 0{,}5a$	28 –	+20 –
Č.0361 Č.0362 Č.0363 Č.0370, Č.0371	240	370 . . . 450	25	$D = 1a$	28 28 28 –	+20 0 –20 –
Č.0460, Č.0461 Č.0462, Č.0463 Č.0471	260	420 . . . 500	22	$D = 2a$	– – 28	– – +20
Č.0481 Č.0482 Č.0483	290	440 . . . 540	22	$D = 2a$	28 28 28	+20 0 –20
Č.0561 Č.0562 Č.0563	360	520 . . . 620	22	$D = 2a$	28 28 28	+20 0 –20
Č.0545 Č.0645 Č.0745	300 340 370	500 . . . 600 600 . . . 720 700 . . . 850	20 15 10	– – –	– – –	– – –

* α – kut savijanja, D – promjer pritiskivača, a – debljina ispitnog uzorka.

Nelegirani čelici za vijke i zakovice: JUS C.B0.506 – 1974.

Ugljični konstrukcijski čelici s garantiranim sastavom
(JUS C.B2.020 – 1958)

Oznaka	Sastav* % C	Sastav* % Mn	Si maks.	Oznaka	Sastav* % C	Sastav* % Mn	Si maks.
Č.1100	0,08 . . . 0,12	0,30 . . . 0,60		**Č.1400**	0,32 . . . 0,38	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1101	0,08 . . . 0,14	0,30 . . . 0,60	0,35	**Č.1500**	0,38 . . . 0,45	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1209	0,10 . . . 0,15	0,30 . . . 0,60		**Č.1501**	0,42 . . . 0,48	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1210	0,12 . . . 0,18	0,30 . . . 0,60	0,35	**Č.1600**	0,48 . . . 0,55	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1211	0,14 . . . 0,22	0,30 . . . 0,60		**Č.1601**	0,52 . . . 0,58	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1300	0,18 . . . 0,25	0,30 . . . 0,60		**Č.1700**	0,58 . . . 0,65	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1301	0,18 . . . 0,25	0,35 . . . 0,60	0,35	**Č.1701**	0,62 . . . 0,70	0,50 . . . 0,80	0,35
Č.1302	0,26 . . . 0,32	0,40 . . . 0,60	0,35				

* Svi ti čelici imaju još P_{max} = 0,06%, S_{max} = 0,06%, P + S ≦ 0,10%.

Sitnozrnati konstrukcijski čelik
(JUS C.B0.502 – 1979)

Vrste: ČRO... osnovni čelik
ČRV... čelici za visoke temperature
ČRN... čelici za niske temperature

Sastav (%)

Oznaka		C maks.	Si maks.	Mn	P maks.	S maks.
Kvalitetni čelici						
Č RO 250	**Č RV 250**	0,18	0,40	0,40...1,30	0,040	0,040
	Č RN 250	0,16	0,40	0,50...1,30	0,030	0,030
Č RO 280	**Č RV 280**	0,18	0,40	0,50...1,40	0,040	0,040
	Č RN 280	0,16	0,40	0,60...1,40	0,030	0,030
Č RO 310	**Č RV 310**	0,18	0,45	0,60...1,50	0,040	0,040
	Č RN 310	0,16	0,45	0,70...1,50	0,030	0,030
Č RO 350	**Č RV 350**	0,20	0,10...0,50	0,90...1,60	0,040	0,040
	Č RN 350	0,18	0,10...0,50	0,90...1,60	0,030	0,030
Plemeniti čelici						
Č RO 380	**Č RV 380**	0,22	–	–	0,040	0,040
	Č RN 380	0,22	–	–	0,035	0,035
Č RO 420	**Č RV 420**	0,22	–	–	0,040	0,040
	Č RN 420	0,22	–	–	0,035	0,035
Č RO 460	**Č RV 460**	0,22	–	–	0,040	0,040
	Č RN 460	0,22	–	–	0,035	0,035
Č RO 500	**Č RV 500**	0,23	–	–	0,040	0,040
	Č RN 500	0,23	–	–	0,035	0,035

Mehanička svojstva (pri temperaturi okoline)

Oznaka ČRO... ČRV... ČRN...	Naprezanje tečenja R_e N/mm² (min.) pri debljini (mm)			Čvrstoća R_m N/mm² pri debljini do 50 mm	Postot. produlj. A_5 %	Pokus savijanja* α = 180° D	
	...16	16)...35	35)...50			uzduž.	popr.
...250	250	250	240	360... 480	25	1*a*	1*a*
...280	280	280	270	390...510	24	1,5*a*	2*a*
...310	310	310	300	440...560	23	2*a*	2,5*a*
...350	350	350	340	490...630	22	2*a*	3*a*
...380	380	370	360	500...650	20	2,5*a*	3,5*a*
...420	420	410	400	530...680	19	2,5*a*	3,5*a*
...460	460	450	440	560...730	17	3*a*	4*a*
...500	500	480	470	610...770	16	3*a*	4*a*

* α – kut savijanja, D – promjer pritiskivača, a – debljina ispitnog uzorka.

Naprezanje tečenja čelika za visoke temperature

Oznaka čelika	Naprezanje tečenja R_e(N/mm²)* pri temperaturi (°C)						
	100	150	200	250	300	350	400
Č RV 250	220	200	190	170	140	120	110
Č RV 280	240	230	210	190	160	140	120
Č RV 310	260	240	230	210	180	160	140
Č RV 350	290	270	250	230	220	200	170
Č RV 380	320	300	280	260	240	220	190
Č RV 420	350	330	310	280	260	230	210
Č RV 460	390	360	340	310	290	260	230
Č RV 500	410	380	360	330	310	280	250

* Pri debljini ispitnog uzorka do 50 mm. (Pri debljinama do 35 mm su pri temperaturama 100 i 150 °C naprezanja tečenja viša za 10 N/mm².)

Žilavost čelika pri niskim temperaturama

Oznaka čelika	Smjer ispitivanja	Žilavost KV (J)* min pri temperaturi (°C)				
		−60	−40	−20	0	+20
Č RO 250, Č RO 280, Č RO 310, Č RO 350, Č RO 380, Č RO 420	**uzdužno**			48	62	62
	poprečno			34	41	41
Č RO 460	**uzdužno**			48	55	62
	poprečno			34	38	41
Č RO 500	**uzdužno**			48	55	55
	poprečno			34	38	41
Č RV 250, Č RV 280, Č RV 310, Č RV 350, Č RV 380, Č RV 420	**uzdužno**			48	55	62
	poprečno			–	41	41
Č RV 460	**uzdužno**			45	51	58
	poprečno			–	41	41
Č RV 500	**uzdužno**			41	48	55
	poprečno			–	41	41
Č RN 250, Č RN 280, Č RN 310, Č RN 350, Č RN 380, Č RN 420	**uzdužno**	34	41	55	62	62
	poprečno	24	31	38	45	45
Č RN 460	**uzdužno**	31	38	51	58	62
	poprečno	24	27	34	41	45
Č RN 500	**uzdužno**	27	34	48	55	62
	poprečno	24	27	31	38	41

* Pri debljini do 50 mm i u normaliziranom stanju.

Čelici za cementiranje
(JUS C.B9.020 – 1974)

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka	Sastav* %				Žareno tvrdoća HB	Jezgra – kaljena		
	C	Mn	Cr	drugo		napr. tečenja R_e N/mm²	vlačna čvrstoća R_m N/mm²	rel. prod. A_5 %
Č. 1120 **Č. 1121**	0,10	0,45	–	–	131	300	500 ... 650	16
Č. 1220 **Č. 1221**	0,15	0,45	–	–	146	360	600 .. 800	14
Č. 1281	0,15	0,45	–	–	146	360	600 ... 800	14
Č. 4120	0,15	0,50	0,55	–	147	. 450	700 ... 900	11
Č. 4320 **Č. 4321**	0,16 0,20	1,15 1,25	0,95 1,15	– –	207 217	600 700	800 . . 1100 1000 ... 1300	10 8
Č. 4381 **Č. 4382**	0,17 0,20	1,15 1,25	0,92 1,15	– –	207 217	600 700	800 ... 1100 1000 ... 1300	10 8
Č. 4520	0,16	0,50	1,65	0,30 Mo 1,55 Ni	229	800	1100 ... 1350	8
Č. 4721	0,20	1,05	1,25	0,25 Mo	217	800	1100 ... 1400	7
Č. 4781	0,21	1,05	1,25	0,25 Mo	217	800	1100 ... 1400	7
Č. 7420 **Č. 7421**	0,20 0,26	0,75 0,75	0,40 0,50	0,45 Mo 0,45 Mo	207 217	600 700	800 ... 1100 1000 . . 1300	10 8
Č. 7480 **Č. 7481**	0,20 0,26	0,75 0,75	0,40 0,50	0,45 Mo 0,45 Mo	207 217	600 700	800 ... 1100 1000 ... 1300	10 8
Č. 5420 **Č. 5421**	0,15 0,18	0,50 0,50	1,55 1,95	1,55 Ni 1,95 Ni	217 235	650 800	900 ... 1200 1200 ... 1450	9 7

* Navedene su prosječne vrijednosti. – Svi nelegirani čelici imaju još 0,15 ... 0,35% Si, legirani 0,15 ... 0,40% Si. – Čelici Č. 1120 i Č. 1220 imaju P_{max} = 0,045% i S_{max} = 0,045%, svi ostali čelici imaju P_{max} = 0,035% i S_{max} = 0,035%.

Toplinska obrada[1) 2)]

Oznaka	Kaljenje jezgre[3)] °C	Međužarenje[4)] °C	Kaljenje površine[3)] °C	Popuštanje °C
Č. 1120 Č. 1121 Č. 1220 Č. 1221 Č. 1281	890 ... 920 v, k	–	–	150 ... 180
Č. 4120	870 ... 900 v, k	–	–	150 . . 180
Č. 4320 Č. 4321 Č. 4381 Č. 4382 Č. 4520 Č. 4721 Č. 4781	850 ... 880 u, k	–	810 ... 840 u	170 . . 210
Č. 7420 Č. 7421 Č. 7480 Č. 7481	890 ... 920	–	–	170 . 210
Č. 5420 Č. 5421	840 ... 870 u, v, k	630 .. 650 p, z	800 ... 830 u, k	170 . . 210

[1)] Kovanje pri 1100 ... 850 °C – [2)] Ugljičenje pri 900 ... 950 °C. – [3)] Gašenje: v – u vodi, u – u ulju, k – u solnoj kupelji 160 ... 250 °C. – [4)] Hlađenje: p – u peći, z – na zraku.

Prokaljivost

Oznaka čelika	Tvrdoća HRC* na udaljenosti od čeone plohe (mm)											
	1,5	3	5	7	9	12	15	20	25	30	35	40
Č. 4320 Č. 4381	47 39	46 35	44 31	41 28	37 24	34 21	33	31	30	29	28	27
Č. 4321 Č. 4382	49 41	49 39	48 36	46 33	44 31	41 28	40 25	37 23	35 21	34	33	31
Č. 4520	48 40	48 40	48 39	48 38	47 37	46 35	46 34	44 32	43 31	42 30	41 29	41 29
Č. 4721 Č. 4781	50 42	50 41	49 39	48 38	47 36	45 34	44 32	42 29	41 27	40 26	39 25	38 24
Č. 7420 Č. 7480	49 41	47 35	43 30	40 27	36 23	32	29	26	24	23	22	21
Č. 7421 Č. 7481	52 44	51 41	50 37	47 33	43 30	39 26	36 24	33 21	31	30	29	28
Č. 5420	47 39	47 38	46 36	45 35	43 32	41 29	39 26	37 24	35 22	34 21	34 20	33 20
Č. 5421	49 41	49 41	49 40	49 39	49 39	49 37	49 36	48 35	47 35	47 34	46 34	46 33

* Gornji i donji broj označuju granične vrijednosti tvrdoće.

Čelici za poboljšavanje (JUS C.B9.021 – 1974)

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka	Sastav* %					Žareno	Poboljšano**		
	C	Mn	Cr	Mo	drugo	tvrdoća HB max.	napr. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	vlačna čvrst. min. N/mm²	postot. prod. A_5 %
Č. 1330	0,22	0.45	–	–	–	156	300	500	22
Č. 1331	0,22	0,45	–	–	–	156	300	500	22
Č. 1430	0,35	0,65	–	–	–	183	370	590	19
Č. 1431	0,35	0,65	–	–	–	183	370	590	19
Č. 1480	0,35	0,65	–	–	–	183	370	590	19
Č. 1530	0,46	0,65	–	–	–	207	420	670	16
Č. 1531	0,46	0,65	–	–	–	207	420	670	16
Č. 1580	0,46	0,65	–	–	–	207	420	670	16
Č. 1630	0,56	0,75	–	–	–	229	470	750	14
Č. 1631	0,56	0,75	–	–	–	229	470	750	14
Č. 1680	0,56	0,75	–	–	–	229	470	750	14
Č. 1730	0,61	0,75	–	–	–	241	500	800	14
Č. 1731	0,61	0,75	–	–	–	241	500	800	14
Č. 1780	0,61	0,75	–	–	–	241	500	800	13
Č. 3130	0,40	0,95	–	–	0,38 Si	217	550	800	14
Č. 3135	0,28	1,48	–	–	–	223	500	700	15
Č. 4130	0,33	0,75	1,05	–	–	217	600	800	14
Č. 4131	0,42	0,65	1,05	–	–	217	680	900	12
Č. 4132	0,38	0,65	0,50	–	–	207	450	700	15
Č. 4133	0,46	0,65	0,50	–	–	207	550	800	14
Č. 4134	0,38	0,75	1,05	–	–	217	640	800	13
Č. 4180	0,33	0,75	1,05	–	–	217	600	800	14
Č. 4181	0,42	0,65	1,05	–	–	217	680	900	12
Č. 4184	0,38	0,75	1,05	–	–	217	640	800	13
Č. 4730	0,25	0,65	1,05	0,22	–	212	600	800	14
Č. 4731	0,34	0,65	1,05	0,22	–	217	680	900	12
Č. 4732	0,42	0,65	1.05	0,22	–	217	780	1000	11
Č. 4733	0.50	0,65	1.05	0,22	–	235	800	1000	10
Č. 4734	0,30	0,55	2.50	0,20	0,15 V	248	1050	1250	9
Č. 4738	0,32	0,55	3,05	0,40	0,30 Ni	248	1050	1250	9
Č. 4781	0,34	0,65	1,05	0,22	–	217	680	900	12
Č. 4782	0,42	0,65	1,05	0,22	–	217	780	1000	11
Č. 4830	0,51	0,90	1,05	–	0,15 V	235	800	1000	10
Č. 5430	0,36	0,65	1.05	0,22	1,05 Ni	217	800	1000	11
Č. 5431	0,34	0,55	1,55	0,22	1,55 Ni	235	900	1100	10
Č. 5432	0,30	0,45	2,00	0,40	2,00 Ni	248	1050	1250	9

* Navedene su prosječne vrijednosti. – Svi čelici (osim Č. 3130 i Č. 3230) imaju još oko 0,25 . . . 0,35% Si. – ** P_{max} i S_{max} su za sve čelike Č. 1330, Č. 1430, Č.1530, Č.1630 i Č.1730 po 0,045%, za sve druge čelike po 0,035%.

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšanje***	
				kaljenje u vodi °C	kaljenje u ulju °C
Č. 1330 Č. 1331	1100 . . . 900	650 . . . 700	880 . . . 910	860 . . . 890	870 . . . 900
Č. 1430 Č. 1431 Č. 1480	1100 . . . 850	650 . . . 700	860 . . . 890	840 . . . 870	850 . . . 880
Č. 1530 Č. 1531 Č. 1580	1100 . . . 850	650 . . . 700	840 . . . 870	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 1630 Č. 1631 Č. 1680	1050 . . . 850	650 . . . 700	830 . . . 860	805 . . . 835	815 . . . 845
Č. 1730 Č. 1731 Č. 1780	1050 . . . 850	650 . . 700	820 . . . 850	800 . . . 830	810 . . . 840
Č. 3130 Č. 3139	1100 . . . 850	650 . . . 700	850 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 4130	1050 . . . 850	680 . . . 720	850 . . . 890	830 . . . 860	840 . . . 870
Č. 4131	1050 . . . 850	680 . . . 720	840 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 4132	1100 . . . 850	650 . . . 700	850 . . . 880	830 . . . 860	840 . . . 870
Č. 4133	1100 . . . 850	650 . 700	840 . . . 870	820 . . 850	830 . . . 860
Č. 4134	1050 . . . 850	680 . . . 720	845 . . . 885	825 . . . 855	835 . . . 865
Č. 4180	1050 . . . 850	680 . . . 720	850 . . . 890	830 . . . 860	840 . . . 870
Č. 4181	1050 . . . 850	680 . . . 720	840 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 4184	1050 . . . 850	680 . . . 720	845 . . . 885	825 . . . 855	835 . . . 865
Č. 4730	1050 . . . 850	680 . . . 720	860 . . . 900	840 . . . 870	850 . . . 880
Č. 4731	1050 . . . 850	680 . . . 720	850 . . . 890	830 . . . 860	840 . . . 870
Č. 4732	1050 . . . 850	680 . . . 720	840 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 4733	1050 . . . 850	680 . . . 720	840 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 4734	1050 . . . 850	680 . . . 720	860 . . . 900	840 . . . 870	850 . . . 880
Č. 4738	1100 . . . 900	680 . . . 720	880 . . . 920	–	860 . . . 900
Č. 4781	1050 . . . 850	680 . . . 720	850 . . . 890	830 . . . 860	840 . . . 870
Č. 4782	1050 . . . 850	680 . . . 720	840 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 4830	1050 . . . 850	680 . . . 720	840 . . 880	(820 . . . 850)	830 . . . 860
Č. 5430	1050 . . . 850	650 . . . 700	850 . . . 880	820 . . . 850	830 . . . 860
Č. 5431	1050 . . . 850	650 . . 700	850 . . . 880	–	830 . . . 860
Č. 5432	1050 . . . 850	650 . . . 700	850 . . . 880	–	830 . . . 860

** Vrijednosti za mehanička svojstva u poboljšanom stanju (str. 366) vrijede pri debljinama materijala 16 . . . 50 mm. Pri manjim (većim) debljinama vrijednosti su za naprezanje tečenja i čvrstoću veće (manje), a za produljenje manje (veće).

*** Popuštanje nakon kaljenja pri 550 . . . 660 °C.

Kaljivost čelika za poboljšanje

Oznaka čelika	Tvrdoća HRC*											
	na udaljenosti od čeone plohe (mm)											
	1,5	3	5	7	9	12	15	20	25	30	40	50
Č. 3139	55	54	51	48	45	40	37	33	31	29	27	26
	46	43	37	31	27	22						
Č. 4130, Č. 4180	57	57	56	54	52	47	44	39	37	35	33	31
	49	48	45	41	35	30	27	23	21	20		
Č. 4131, Č. 4181	61	61	60	59	58	55	52	46	42	40	37	35
	53	52	50	47	44	39	35	30	27	25	22	20
Č. 4132	59	57	54	49	43	38	35	32	30	27	24	22
	51	46	37	29	25	21						
Č. 4133	63	61	57	52	46	41	38	35	33	31	28	26
	54	49	40	32	28	24	22	20				
Č. 4134, Č. 4184	59	59	58	57	55	51	48	42	39	37	35	33
	51	50	48	44	39	34	31	26	24	22		
Č. 4730	52	52	51	50	48	44	41	37	35	33	31	31
	44	43	40	37	34	30	27	23	21	20		
Č. 4731, Č. 4781	57	57	57	56	55	53	52	48	45	43	40	39
	49	49	48	45	42	38	34	30	28	27	25	24
Č. 4732, Č. 4782	61	61	61	60	60	59	58	56	53	51	47	45
	53	53	52	51	50	46	43	38	35	34	32	32
Č. 4733	64	64	64	63	63	61	60	59	57	55	53	52
	56	55	54	53	51	49	46	42	40	39	37	36
Č. 4734	56	56	56	56	56	56	55	54	53	52	50	48
	48	48	47	47	46	45	44	41	39	38	36	34
Č. 4738	57	57	57	57	57	57	57	56	55	55	54	53
	49	48	48	48	47	47	46	46	46	46	45	44
Č. 4830	65	65	64	64	63	62	61	60	58	56	54	53
	57	56	56	55	53	51	48	44	41	40	38	37
Č. 5430	59	59	58	58	57	57	56	55	54	53	51	49
	51	50	49	49	48	46	45	43	41	39	36	33
Č. 5431	58	58	58	58	57	57	56	56	56	55	55	55
	50	50	49	49	48	48	47	46	45	44	43	41
Č. 5432	57	57	57	57	56	56	56	56	55	55	55	55
	49	49	49	49	48	48	47	47	46	46	45	44

* Gornji i donji broj označuju granične vrijednosti tvrdoće.

Čelici za nitriranje

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka po JUS	Sastav %					Tvrdoća (žar.)	U poboljšanom stanju			Tvrdoća nitrirane površine
	C	Cr	Mo	Al	ostalo	HB	naprez. teč. $R_{p0,2}$ N/mm²	vlačna čvrstoća N/mm²	post. prod. A_5 %	HV
Č. 4531	0,34	1,7	0,2	0,1	1,0 Ni	245	590	780 ... 980	13	950
Č. 4734	0,30	2,5	0,2	–	0,15 V	248	785	980 ... 1180	11	750
Č. 4739	0,33	1,1	0,2	0,1	–	248	590	780 ... 980	14	900

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje °C	Normaliziranje °C	Kaljenje °C	Popuštanje °C
Č. 4531	1050 ... 850	650 ... 700	—	850 ... 900 ulje	580 ... 660
Č. 4734	1050 ... 850	680 ... 720	860 ... 900	850 ... 880 ulje	580 ... 630
Č. 4739	1050 ... 850	680 ... 710	900 ... 930	870 ... 910 voda	580 ... 650

Magnetski lim za transformatore i električne strojeve
(JUS C. K5.020 — 1955)

Oznaka	Gubici (W/kg) za B (T)		Magnetska indukcija B (T) u magnetskom polju H (A/m)						
	1,0	1,5	40	160	1000	5000	10000	50000	100000
Transformatorski lim									
MT 93	0,93	2,40	0,45	1,02	1,36	1,55			
MT 100	1,00	2,60	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 110	1,10	2,80	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 125	1,25	3,10	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 135	1,35	3,40	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 145	1,45	3,70	0,20	0,87	1,34	1,55			
Dinamo-lim									
MD 170	1,70	4,30		0,86	1,34	1,57	1,70	2,01	2,09
MD 200	2,00	5,30		0,86	1,34	1,57	1,70	2,01	2,09
MD 240	2,40	6,80		0,92	1,39	1,63	1,75	2,08	2,17
MD 200	2,80	8,00		0,92	1,39	1,63	1,75	2,08	2,17
MD 700	... 7,00	... 16,00		0,92	1,39	1,63	1,75	2,08	2,17

Čelici za automate
(JUS C.BO.505 – 1984)

Oznaka	Sastav %					Upotreba za
	C	Si	Mn	S	P max.	
Č. 1190	0,07…0,12	do 0,25	0,60…0,90	0,18…0,25	0,07	cementiranje
Č. 1290	0,12…0,18	0,10…0,40	0,60…0,90	0,18…0,26	0,07	cementiranje
Č. 1490	0,32…0,39	0,10…0,40	0,60…0,90	0,15…0,25	0,07	poboljšanje
Č. 1590	0,42…0,50	0,10…0,40	0,60…0,90	0,15…0,25	0,07	poboljšanje
Č. 3190	0,14…0,20	0,10…0,40	1,10…1,40	0,20…0,25	0,07	cementiranje
Č. 3990	0,08…0,14	do 0,05	0,90…1,30	0,24…0,32	0,11	
Č. 3991	0,10…0,15	do 0,05	1,00…1,50	0,30…0,40	0,11	
Č. 3993	0,08…0,14	do 0,05	0,90…1,30	0,24…0,32	0,11	0,15…0,35Pb

Mehanička svojstva (pri debljini 16…40 mm)

Oznaka	Stanje	Naprezanje tečenja R_e N/mm²	Vlačna čvrstoća N/mm²	Postotno produlj. A_5 % min.
Č. 1190	hladno vučeno normalizirano	355 215	460…710 > 350	9 25
Č. 1290	hladno vučeno normalizirano	375 225	460…710 > 370	8 23
Č. 1490	hladno vučeno normalizirano poboljšano	315 285 365	540…740 480…600 580…730	8 18 16
Č. 1590	hladno vučeno normalizirano poboljšano	375 325 410	640…830 580…700 660…800	7 14 13
Č. 3190	hladno vučeno normalizirano	410 250	510…760 > 380	8 20
Č. 3990	hladno vučeno normalizirano	375 225	460…710 > 370	8 23
Č. 3991	hladno vučeno normalizirano	390 225	490…740 > 370	8 23
Č. 3993	hladno vučeno normalizirano	375 225	460…710 > 370	8 23

Toplinska obrada čelika za automate pri cementiranju

Oznaka	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Ugljičenje °C	Toplinska obrada nakon ugljičenja* °C
Č. 1190 Č. 1290 Č. 3190	650…700 (za vučeni čelik 600…620)	890…920	u prašku 850…930 u sol. kup. 780…930 u plinu 900…920	1. kaljenje 890…920/v, u međužar. 650…680 2. kaljenje 770…800/v, u popuštanje 150 (1 h)

* Gašenje: v – u vodi, u – u ulju.

Toplinska obrada čelika za automate – za poboljšanje

Oznaka	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšanje*	
			gašenje °C	popuštanje °C
Č. 1490	650…700	860…890	840…870/v ali 850…880/u	530…670
Č. 1590	650…700	840…870	830…860/u	530…670

* Gašenje: v – u vodi, u – u ulju.

Čelici za opruge

(JUS C.B0.551 – 1984)

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka	Sastav (prosječne vrijednosti) %					Žarenje	Poboljšano		Post. prod. A_5 %
	C	Si	Mn	Cr	V	tvrdoća HB maks.	naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	vlačna čvrstoća R_m N/mm²	
Č. 2133	0,55	1,65	0,85	–	–	245	1130	1320…1570	6
Č. 2330	0,60	1,45	1,05	–	–	255	1130	1320…1570	6
Č. 2332	0,64	1,65	0,85	–	–	255	1130	1320…1570	6
Č. 2430	0,60	1,65	0,85	0,30	–	255	1130	1320…1570	6
Č. 4230	0,67	1,30	0,50	0,50	–	255	1180	1370…1620	6
Č. 4332	0,55	0,25	0,85	0,85	–	248	1180	1370…1620	6
Č. 4830	0,51	0,25	0,90	1,05	0,15	241	1180	1370…1670	6

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšanje*	
				kaljenje °C	popuštanje °C
Č. 2133 Č. 2330 Č. 2332 Č. 2430	1050…850	640…680	830…860	830….860/u	350…550
Č. 4230 Č. 4332 Č. 4830	1100…850	640…680	850…880	830….860/u	350…550

* Gašenje: u – u ulju.

*

Čelici za lance: JUS C.B0.507 – 1973.

Hladno valjani čelični lim od malougljičnog čelika
(JUS C.B4.016 – 1978)

Oznaka*	Sastav (%) C maks.	Mn maks.	P maks.	S maks.	Naprez. tečenja R_e N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. produlj. A_5 %	Tvrdoća HRB	HR30T
Č. 0145	0,15	0,60	0,050	0,050	–	200...500	–	–	–
Č. 0146	0,12	0,50	0,040	0,040	280	280...410	28	65	60
Č. 0147	0,10	0,45	0,030	0,030	250	280...380	32	57	55
Č. 0148	0,08	0,45	0,030	0,030	220	280...360	36	50	50

* Pri Č.0145 do Č.0148: dodatna oznaka N: neumireno
Pri Č.0147 i Č.0148: još i dodatna oznaka SU: specijalno umireno
Upotreba: Č.0145 – za opću upotrebu; Č.0146 – za izvlačenje;
Č.0147 – za duboko izvlačenje; Č.0148 – za veoma duboko izvlačenje

Hladno valjane čelične trake od malougljičnog čelika
(JUS C.B3.521 – 1967)

Vrste čelika: Č.0146, Č.0147, Č.0148

Dopunska Oznaka	Stupanj tvrdoće	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_{10} %	Upotrebljivost
HT 28	meko	280...400	25	} izvlačenje
HT 30	ojačano	300...420	23	
HT 32	1/8 tvrdo	320...440	16	izvlačenje
HT 40	1/4 tvrdo	400...500	10	štancanje
HT 45	1/2 tvrdo	450...550	5	} probijanje
HT 55	3/4 tvrdo	550...650	3	
HT 60	tvrdo	> 600	2	

Valjana čelična žica
(JUS C.B0.501 – 1977)

Skupina	Oznaka žice*		Sastav (%)** C	Si	Mn	P	S	drugo
A	Ž 8N	Ž 8U	0,08	0,30	0,48	0,040	0,040	–
	:	:	:	:	:	:	:	:
	Ž22N	Ž22U	0,22	0,30	0,58	0,050	0,050	–
B	PŽ12		0,15	0,20	0,45	0,040	0,040	0,025 Cu
	:		:	:	:	:	:	0,015 Cr
	PŽ90		0,95	0,20	0,50	0,040	0,040	0,015 Ni

* N – neumireno, U – umireno.
** Prosječne vrijednosti.

*

Vučena obična čelična žica (JUS C.B6.010 – 1980)
Vučena čelična žica za posebne svrhe (JUS C.B6.011 – 1980)
Vučena čelična žica za opruge (JUS C.B6.018 – 1980)

Čelici za valjane cijevi propisanih mehaničkih svojstava
(JUS C.B5.021 – 1964)

Oznaka	Sastav* % C	Mn min.	Si	Naprez. tečenja R_e N/mm² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. produlj A_5 % min.
Č.1212	do 0,17	≧ 0,40	0,10...0,35	240	350...450	25
Č.1213	do 0,22	≧ 0,40	0,10...0,35	260	450...550	21
Č.1402	do 0,36	≧ 0,40	0,10...0,35	300	550...650	17
Č.1502	≈ 0,45	≧ 0,40	0,10...0,35	400	650...750	12
Č.3100	do 0,22	≦ 1,50	0,10...0,55	360	520...620	22

* Sve vrste čelika te skupine imaju P ≦ 0,05% i S ≦ 0,05%.

Čelici za valjane cijevi za više temperature (JUS C.B5.022 – 1965)

Sastav (%)

Oznaka	C	Si	Mn	Cr	Mo	P maks.	S maks.
Č.1214	do 0,17	0,10...0,35	do 0,40	–	–	0,05	0,05
Č.1215	do 0,22	0,10...0,35	do 0,45	–	–	0,05	0,05
Č.7100	0,12...0,20	0,15...0,35	0,50...0,80	–	0,25...0,35	0,04	0,04
Č.7400	0,10...0,18	0,15...0,35	0,40...0,70	0,7...1,0	0,40...0,50	0,04	0,04
Č.7401	do 0,15	0,15...0,50	0,40...0,60	2,0...2,5	0,9 ...1,1	0,04	0,04

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprezanje tečenja R_e N/mm²* pri temperaturi °C 20	200	250	300	350	400	450	500	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 % min
Č.1214	235	186	167	137	118	108	88	–	340. .440	25
Č.1215	255	206	186	157	137	128	108	–	440...540	21
Č.7100	285	255	235	206	186	177	167	147	440...570	22
Č.7400	295	275	255	235	216	206	196	176	440.. 570	22
Č.7401	265	245	235	226	216	206	196	186	440...590	20

* Vremensko naprezanje tečenja i čvrstoća razabiru se iz tablice na str. 375.

Toplinska obrada

Oznaka	Oblikovanje u vrućem °C	Žarenje nakon oblikov. u hladnom °C	Normalizacija °C	Poboljšanje kaljenje* °C	popuštanje °C
Č.1214	1100...850	650...700	900...930	–	–
Č.1215	1100...850	650...700	870 ..900	–	–
Č.7100	1100...850	660...700	910...940	–	–
Č.7400	1100...850	680...720	–	910. .940 z	650...720
Č.7401	1100...850	730...780	–	900...960 z	680...780

* z – hlađenje na zraku.

Čelik za kotlovski lim (JUS C.B4.014 – 1977)

Sastav i toplinska obrada

Oznaka	Sastav (%)* C	Si	Mn	Cr	Mo	Vruća obrada °C	Normalizacija °C	Žarenje za popušt. napetosti °C
Č. 1202	< 0,16	< 0,35	> 0,40	< 0,30		1000 ... 850	910 ... 940	600 ... 650
Č. 1204	< 0,20	< 0,35	> 0,50	< 0,30			890 ... 920	
Č. 1206	< 0,22	< 0,35	> 0,55	< 0,30			880 ... 910	
Č. 3105	0,17	0,30	1,05	< 0,30			880 ... 910	550 ... 620
Č. 3133	0,20	0,50	1,15	< 0,30			–	
Č. 7100	0,16	0,25	0,60		0,30		910 ... 940	600 ... 650
Č. 7400	0,14	0,25	0,55	0,85	0,45		– **	650 ... 720

* Čelici Č. 1202 do 1206 imaju najviše po 0,050% P i S, drugi čelici pa najviše po 0,040% P i S. – ** Čelik Č. 7400 poboljšava se kaljenjem pri 910 ... 940 °C i popuštanjem pri 650 ... 720 °C.

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprezanje tečenja R_e N/mm² pri temperaturi °C: 20	200	300	400	450	500	Vlačna čvrstoća N/mm²	Post. prod. A_5 %	Žilavost $KU/3$ J	Pokus savijanja (α = 180 °) *
Č. 1202	215	177	137	98	78		340 ... 440	25	56	$D = 0,5\,a$
Č. 1204	245	206	157	118	98		400 ... 490	22	49	$D = 2\,a$
Č. 1206	265	226	177	137	118		430 ... 520	21	42	$D = 2,5\,a$
Č. 3105	315	265	226	176	156		510 ... 610	18	35	$D = 3,5\,a$
Č. 3133	275	245	206	157	136		460 ... 550	19	35	$D = 3\,a$
Č. 7100	285	255	206	177	167	147	440 ... 570	21	42	$D = 3\,a$
Č. 7400	295	275	235	206	196	176	440 ... 570	20	42	$D = 3\,a$

* α – kut savijanja, D – promjer pritiskivača, a – debljina ispitnog uzorka.

Temperatura	°C	20	300	400	500	600
Modul elastičnosti E	N/mm²	210000	185000	175000	165000	155000

Toplinska vodljivost i temperaturni koeficijent rastezanja

Oznaka	Toplinska vodljivost λ W/mK pri temperaturi °C: 20	100	200	300	400	500	600
Č. 1202	54,7	52,9	50,0	47,1	44,2	40,7	
Č. 1204	53,5	51,7	48,8	45,9	43,0	40,1	
Č. 1206	52,3	50,6	48,3	45,3	42,4	39,5	
Č. 3105	53,5	51,2	47,7	44,2	39,5	34,9	
Č. 7100	49,4	48,3	45,9	43,6	40,7	37,8	34,9
Č. 7400	44,2	43,0	41,3	39,5	37,2	34,3	31,4

Između 20 °C i temperature °C	100	200	300	400	500	600
Temperaturni koef. rastezanja α µm/(m · K)	11,1	12,1	12,9	13,5	13,9	14,1

Vremensko naprezanje tečenja i čvrstoća

Vremensko naprezanje tečenja $R_{p1/t}$ je naprezanje koje izaziva trajno postotno produljenje 1%:

R_{p1}/10000 – v 10000 h
R_{p1}/100000 – v 100000 h

Vremenska čvrstoća $R_{m/t}$ je naprezanje koje izaziva lom:

R_m/10000 – v 10000 h
R_m/100000 – v 100000 h
R_m/200000 – v 200000 h

Oznaka čelika	R_{p1}, R_m N/mm²	Temperatura °C: 380	400	420	440	460	480	500	520
Č. 1202	R_{p1}/10000	164	136	113	91	72	53	38	
Č. 1204	R_{p1}/100000	118	95	74	57	42	30	21	
Č. 1206	R_m/10000	229	191	158	127	100	75	54	
Č. 1214	R_m/100000	165	132	103	79	59	42	29	
Č. 1215	R_m/200000	145	115	89	67	48	33	24	
Č. 3105, Č. 3133	R_{p1}/10000		167	135	107	82	63	49	39
	R_{p1}/100000		118	92	69	51	38	29	22
	R_m/10000		250	200	156	121	90	69	54
	R_m/100000		177	136	103	75	53	39	30
	R_m/200000		158	119	89	65	44	32	26

Oznaka čelika	R_{p1}, R_m N/mm²	Temperatura °C: 460	480	500	520	540	560	580	600
Č. 7100	R_{p1}/10000	199	166	132	99	71			
	R_{p1}/100000	147	107	74	46	28			
	R_m/10000	279	228	177	127	86			
	R_m/100000	211	143	93	59	38			
	R_m/200000	193	121	74	45	28			
Č. 7400	R_{p1}/10000	227	192	157	122	90	64		
	R_{p1}/100000	167	133	98	70	46	30		
	R_m/10000	338	284	230	172	125	86		
	R_m/100000	252	190	137	94	61	40		
	R_m/200000	229	167	115	76	47	31		
Č. 7401	R_{p1}/10000		179	147	119	94	73	57	44
	R_{p1}/100000		130	103	78	58	41	30	23
	R_m/10000		240	196	157	123	95	74	59
	R_m/100000		184	142	108	78	56	41	29
	R_m/200000		170	128	95	68	47	33	24

Čelici otporni prema kemijskim ntjecajima

*Sastav i mehanička svojstva**

Oznaka		Sastav %					Naprez. teč. $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Post. prod. A_5 %
JUS	Željezarna Ravne	C	Cr	Ni	Si, Mo	ost.			
Č. 4170	Prokron 1	0,08	13,0	–	–	–	400	550 ... 700	16
Č. 4171	Prokron 2	0,15	13,0				450	650 ... 800	16
Č. 4172	Prokron 3	0,20	13,0				550	800 ... 950	14
Č. 4570	Prokron 2 spec.	0,20	17,0	2,0			600	800 ... 950	14
Č. 4572	Prokron 11 spec.	0,08	18,0	10,5		+ Ti	205	500 ... 750	35
Č. 4573	Prokron 12	0,08	17,5	12,5	2,0 Mo		205	500 ... 700	40
Č. 4574	Prokron 12 spec.	0,08	17,5	12,5	2,0 Mo	+ Ti	225	500 ... 750	35
Č. 4580	Prokron 11 ex.	0,07	18,0	11,0			185	500 ... 700	45
Č. 4582	Prokron 11 Nb	0,10	18,0	10,0		+ Nb	205	500 ... 750	35
Č. 4583	Prokron 12 Nb	0,10	18,0	12,0	2,0 Mo	+ Nb	225	500 ... 750	35

* Za čelike od Č. 4170 do Č. 4570 u poboljšanom stanju, za austenitne čelike od Č. 4571 do Č. 4583 u gašenom stanju.

Čvrstoća pri višim temperaturama

Oznaka	Čvrstoća N/mm² pri °C								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Č. 4171 Č. 4172	750	700	650	600	550	500	340	240	65
Č. 4570	750	700	650	600	550	500	340	240	65

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Žarenje °C	Kaljenje** °C	Popuštanje*** °C
Č. 4170	1150 ... 750	750 ... 800	950 ... 1000 u,z	700 ... 750
Č. 4171	1150 ... 750	750 ... 800	980 ... 1030 u,z	700 ... 750
Č. 4172	1150 ... 750	750 ... 800	950 ... 1030 u,z	650 ... 700
Č. 4570	1100 ... 750	660 ... 700	1000 ... 1050 u	630 ... 720

* Polagano zagrijavati i polagano ohlađivati. – ** Gašenje: u – u ulju, z – na zraku.
*** Boje popuštanja za te čelike ne vrijede (vidi str. 352).

Austenitne čelike (Č. 4571 do Č. 4583) kujemo pri 1150 ... 750 °C, a gasimo pri 1050 ... 1100 °C u vodi.

Čelici za ventile

Sastav i mehanička svojstva (u poboljšanom stanju)

Oznaka		Sastav %					Naprez. teč. $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Post. prod. A_5 %
po JUS	Željezarna Ravne	C	Si	Cr	Ni	drugo			
Č. 2331	2 Si	0,60	1,7	–	–	–	685	880 ... 1030	12
Č. 4270	Prokron 8	0,45	3,2	9,0	–	–	700	800 ... 1100	14
Č. 4581	Prokron 9	0,80	2,0	20,0	1,4	–	685	880 ... 1130	5
Č. 4588	21-4-N	0,50	–	21,0	4,0	0,40 N	540	980 ... 1180	10
Č. 4870	28-30-4-N	0,5	–	21,0	3,8	9,0 Mn*	600	950 ... 1150	10

* Također: 1,0 Mo; 1,0 V; 1,0 Nb; 0,40 N.

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje °C	Kaljenje[2)] °C	Popuštanje °C
Č. 2331	1050 ... 1080	680 ... 720	830 ... 850 u	620 ... 680
Č. 4270	1100 ... 900[1)]	700 ... 820	1000 ... 1050 u	700 ... 820[3)]
Č. 4581	1100 ... 900[1)]	820 ... 860	1050 ... 1180 u, z	700 ... 750
Č. 4588	1150 ... 900[1)]	–	1140 ... 1180 v	–
Č. 4870	1100 ... 950[1)]	770 ... 820	1140 ... 1180 u, z	650 ... 750

[1)] Ohlađivanje u pepelu. – [2)] Oznake: »u« i »z« znače gašenje u ulju, odn. na zraku. – [3)] Ohlađivanje 1 ... 2 h na zraku.

Vatrostalni čelici

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka		Sastav %						Naprez. teč. $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Post. prod. A_5 %
po JUS	Željezarna Ravne	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al			
Č. 4970	Prokron 10	0,12	1,3	–	24,0	–	1,5	280	520 ... 720	10
Č. 4972	X 10 Cr Al 13	0,12	1,0	–	13,0	–	1,0	250	450 ... 650	15
Č. 4973	X 10 Cr Al 18	0,12	1,0	–	18,0	–	1,0	270	500 ... 700	12
Č. 4578	Prokron 19	0,20	2,0	1,5	25,0	20,0	–	230	550 ... 800	30
Č. 4579	Prokron 20	0,15	1,7	1,5	16,0	35,0	–	230	550 ... 800	30

Toplinska obrada i upotreba

Oznaka	Kovanje	Žarenje	Gašenje u vodi	Upotreba	
Č. 4970	1100 ... 750	750 ... 850	–	postoj. u vatri do 1150 °C	podnosi S
Č. 4972	1100 ... 800	800 ... 850	–	postoj. u vatri do 850 °C	
Č. 4973	1100 ... 800	800 ... 850	–	postoj. u vatri do 1000 °C	
Č. 4578	1150 ... 850	–	1500 ... 1100	austenitni čelik, postojan do 1200 °C	ne podnosi S
Č. 4579	1100 ... 850	–	1500 ... 1100		

Čelici postojani pri višim temperaturama

Za standardirane vrste čelika Č. 7100 i Č. 7400 vidi podatke na str. 374!

Sastav i mehanička svojstva (u poboljšanom stanju)

Oznaka po JUS	Sastav % C	Mn	Cr	Mo	V	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %
Č. 7431	0,22	0,60	1,1	0,45	–	500	650...800	15
Č. 7432	0,24	0,60	1,3	0,50	0,2	550	700...850	16

Trajna čvrstoća pri višim temperaturama

Oznaka	Granica puženja N/mm² pri °C 400	450	500	550	Upotreba (do 530 °C)
Č. 7431	320	240	150	(70)	dijelovi parnih turbina (osovine, diskovi)
Č. 7432	360	290	200	(100)	dijelovi parnih turbina (osovine, diskovi)

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Žarenje** °C	Normalizacija °C	Kaljenje*** °C	Popuštanje °C
Č. 7431	1100...850	700...730	900...930	870...900 u	600...660
Č. 7432	1100...850	660...710	900...930	900...950 u, z	600...680

* Ohlađivanje u pepelu. – ** Ohlađivanje u peći. – *** Gašenje: z – na zraku, u – u ulju.

Čelici otporni prema habanju

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka po JUS	Želez. Ravne	Sastav % C	Mn	Stanje čelika	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %
Č. 3134	2 Mn	0,5	1,8	poboljšano	1050	1200...1400	7
Č. 3160	12 Mn	1,2	12,0	gašeno	350	800...1000	30

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje °C	Normalizacija °C	Kaljenje* °C	Popuštanje °C
Č. 3134	1050...850	680...700	830...850	790...830 u	480...520
Č. 3160**	1050...850	–	–	–	–

* u – gašenje u ulju. – ** Austenitni čelik Č. 3160 gasimo pri 1050 °C u vodi.

ALATNI ČELICI

Ugljični alatni čelici

Sastav i upotreba

Oznaka JUS	Željezarna Ravne	Sastav* C %	Upotreba
Č. 1531	CK 45	0,45	čekići, sjekire, noževi, svrdla za drvo
Č. 1731	CK 60	0,60	čekići za kamen, pile, držala za alat
Č. 1740	OC 70	0,70	meki čelik za vrlo žilav alat
Č. 1840	OC 80	0,80	žilavi čelik za alat za obradu mekog materijala
Č. 1940	OC 100	1,0**	žilavo-tvrdi čelik za alat koji treba da je prilično tvrd i odgovarajuće žilavosti
Č. 1941	OC 100 extra	1,0**	žilavo-tvrdi čelik za alat koji treba da je prilično tvrd i odgovarajuće žilavosti
Č. 1943	OC 120	1,2	polutvrdi čelik za alat koji treba da je osobito tvrd uz manju žilavost
Č. 1944	OC 120 extra	1,2**	polutvrdi čelik za alat koji treba da je osobito tvrd uz manju žilavost
Č. 1841	Kose	0,80	vrlo čist čelik za kose
Č. 1948	OCP 135	1,3	osobito tvrdi čelik za najtvrđe male i srednje turpije

* Svi ti čelici imaju najviše po 0,30% Si i Mn.
** Čelici Č. 1941 i Č. 1944 sadrže još 0,1% V.

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Meko žarenje** °C	tvrdoća HB	Kaljenje (u vodi)*** °C	tvrdoća HRC
Č. 1531	1100...850	650...700	197	820...850 v	54
Č. 1731	1050...850	650...700	231	800...930 o	61
Č. 1740	1050...800	690...720	180	770...800 v	63
Č. 1840	1050...800	690...720	190	770...800 v	64
Č. 1940	1000...800	690...720	200	760...790 v	65
Č. 1941	1000...800	690...720	200	760...800 v	65
Č. 1943	1000...800	690...720	210	760...790 v	65
Č. 1944	1000...800	690...720	210	760...800 v	65
Č. 1841	1050...800	680...720	175	780...810 o	65
Č. 1948	1000...800	690...720	210	760...780 v	65

* Nakon kovanja ohlađivanje na zraku.
** Žarenje 3...10 h.
*** Popuštanje pri 100...200 °C.

Legirani alatni čelici

Legirani alatni čelici za rad u hladnom

Sastav i upotreba

Oznaka JUS	Oznaka Železarna Ravne	Sastav % C	Cr	V	W	ostalo	Upotreba
Č. 4141	OCR 1	1,15	0,70	0,10			navojna svrdla, narez-
Č. 4143	OCR 3	1,4	0,70				nice, razvrtala
Č. 4145	OCR 4 extra	1,0	1,5				kalibri, matrice,
Č. 4149	OCR 3 extra	1,4	0,50				turpije, razvrtala
Č. 4150	OCR 12	2,1	11,5				rezni alat, alat za reza-
Č. 4650	OCR 12 spec.	2,1	11,5		0,70		nje navoja, ručne ma-
Č. 4750	OCR 12 extra	1,65	11,5	0,15	0,50	0,6 Mo	trice, štance
Č. 4850	OCR 12 VM	1,55	12,0	1,0		0,9 Mo	rezanje, štancanje
Č. 4172	Prokron 3	0,20	13,0				
Č. 41702	Prokron 4	0,32	13,0				kirurški instrumenti,
Č. 41704	Prokron 4 ex	0,45	13,0				matrice za tablete i sl.
Č. 47702	Prokron 5	0,45	14,0	0,10		0,50 Mo	
Č. 5840	84 Ni V 4	0,85	–	0,15	–	0,9 Ni	udarni alat
Č. 7440	OH 49	0,60	3,3	0,15	–	1,1 Mo	rad u hlad. i vrućem
Č. 8140	145 V 33	1,45	–	3,2	–	–	ind. noževi, prešanje

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Meko žarenje tvrd. HB	Kaljenje °C	Kaljenje hl.*	Kaljenje tvrd. HRC	Popuštanje °C
Č 4141	1050...850	720. .760	220	780... 820 800.. 840	v u	64...66 64...66	150...250
Č. 4143	1000...800	720...760	220	770... 810 780... 840	v u	65...67 65...67	150...250
Č. 4145	1050...850	760...800	225	820... 860 790. . 820	u v	63...66 63...67	100. .300
Č. 4149	1000.. 800	720.. 760	220	770.. 810	v	65...67	150 ..250
Č. 4150	1050...850	800...840	250	940... 980	u, t	63...65	150...400
Č. 4650	1050...850	800...840	250	940... 980	u, t	64...66	150...400
Č. 4750	1050.. 850	800...840	250	980...1020	u,t,z	63...65	150 ..400
Č. 4850	1050...850	840...880	250	1000...1040	u,t,z	62...64	150...550
Č. 4172	1100...850	770...800	220	950...1020	u, z	44...53	150...450
Č. 41702	1100...850	770 ..800	225	950. .1020	u, z	52...58	150...450
Č. 41704	1050.. 850	760...800	225	990...1020	u, z	53 ..58	100. .400
Č. 47702	1050 . 850	770.. 800	250	950...1020	u, z	53. .60	150...450
Č. 5840	1050...850	700...740	220	780... 840	v	64...66	150...250
Č. 7440	1050. .850	820...850	240	950...1000	u, z	61...63	100. .600
Č. 8140	1100...900	720...760	230	800... 880 840... 950	v u	64...67 64...67	180. .350

* hl. – hlađenje pri kaljenju: v – voda, u – ulje, t – termalna kupka, z – zrak.

Legirani alatni čelici za rad u hladnom

Sastav i upotreba

Oznaka po JUS	Oznaka Železarna Ravne	Sastav % C	Cr	V	W	ostalo	Upotreba
Č. 4754	CRV	1,0	10,0	0,25		1,1 Mo	udarno rezanje
Č. 4755	CRV 2	0,53	8,5	0,10		0,9 Si; 1,2 Mo	noževi za drvo, pile
Č. 4756	OA 2	1,0	5,0	0,25	1,2	1,0 Mo	rezanje plastike
Č. 4835	31 Cr V 3	0,33	0,60	0,10			ključevi za vijke
Č. 4844	OL 2 spec.	0,80	0,50	0,20			noževi za drvo i papir
Č. 6443	OSIKRO 2	0,45	1,0	0,20	2,0	1,0 Si	pneumatski alat, za
Č. 6444	OSIKRO 4	0,60	1,0	0,15	2,0	0,60 Si	rad u hlad., vrućem
Č. 6445	OSIKRO sp.	0,80	1,0	0,30	2,0		industrijski noževi
Č. 3840	Merilo	0,90	0,30	0,10		2,0 Mn	mjerni alat
Č. 6440	Merilo extra	1,05	1,0		1,2	1,0 Mn	mjerni alat
Č. 6840	OW 1	1,2	0,20	1,10	1,0		navojna svrdla
Č. 6441	OW 3	1,1	1,2	0,20	1,3		ravrtači, glodala
Č. 6842	OW spec.	1,0		0,2	1,0		noževi za drvo
Č. 6850	OW 5	1,4	0,50	0,25	4,5		rezni alat

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Meko žarenje tvrd. HB	Kaljenje °C	Kaljenje hl.*	Kaljenje tvrd. HRC	Popuštanje °C
Č. 4754	1050...850	840...870	250	1000...1020	u	61...63	150...550
Č 4755	1050...900	840...870	250	1000.. 1020	u	59...63	150...550
Č. 4756	1050...850	830...870	250	940... 980	z,u,t	62...65	150...550
Č. 4835	1050...850	680...720	220	830... 860	v	52...55	100...400
Č. 4844	1000...800	680...720	230	800. . 830	u	63...65	160...400
Č. 6443	1050...850	720...750	230	890... 930 860... 900	u v	56. 59 61...64	150...400
Č. 6444	1050...850	720...750	240	860... 900	u	60...64	150...400
Č. 6445	1050...850	720...750	250	860... 890	u	61...65	150...400
Č. 3840	1050...850	690...720	220	760... 800 770 .. 810	u t	63...65 63...65	100...300
Č. 6440	1050...850	720...750	230	790... 830 800... 840	u t	63...66 63...66	100...300
Č. 6840	1050...850	720...750	230	760... 820 800... 840	v u	65...67 63...65	150...250
Č. 6441	1050...850	720...750	230	800... 860 780... 830	u v	64...66 65...67	150...300
Č. 6842	1050...850	720...750	230	780... 820 820... 860	v u	65...67 64...66	150...250
Č. 6850	1050...850	720...750	270	800... 830	v	66...68	100...250

* hl. – rashladno sredstvo: v – voda, u – ulje, t – termalna kupelj, z – zrak.

Legirani alatni čelici za rad u vrućem

Sastav i upotreba

Oznaka po JUS	Oznaka Željezarna Ravne	Sastav % C	Cr	V	W	Mo	drugo	Upotreba
Č. 4742	Utop N	0,40	1,9			0,2	1,5 Mn	utopi, matrice trnovi, kokile
Č. 4751	Utop Mo 1	0,40	5,0	0,40		1,3	1,0 Si	
Č. 4752	Utop 3	0,36	5,0	0,25	1,4	1,4	1,0 Si	
Č. 4753	Utop Mo 2	0,40	5,0	1,0		1,3	1,0 Si	
Č. 4757	Utop Mo 4	0,50	5,0	1,0		1,5	1,0 Si	
Č. 4758	Utop Mo 6	0,72	5,5	0,65	1,2	1,35	1,0 Si	
Č. 5741	Utop extra 1	0,55	0,70	0,10		0,30	1,7 Ni	
Č. 5742	Utop extra 2	0,55	1,1	0,10		0,50	1,7 Ni	
Č. 6450	Utop 1	0,30	1,0	0,20	4,0		1,0 Si	
Č. 6451	Utop 2	0,30	2,5	0,40	9,0			
Č. 7450	Utop 33	0,32	3,0	0,50		3,0		
Č. 9750	Utop Co 2	0,32	3,0	0,50		3,0	3,0 Co	

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Meko žarenje tvrd. HB	Kaljenje °C	Kaljenje hl.*	Kaljenje tvrd. HRC	Popuštanje °C
Č. 4742	1080...850	700...740	230	840...870 860...900	t, u z	54...56 52...54	600...680
Č. 4751	1100...900	800...830	250	980...1030 1000...1050	u, t z	52...56 50...55	570...700
Č. 4752	1100...900	750...800	250	890...1040 890...1040	u, t z	54...58 52...57	400...650
Č. 4753	1100...850	800...830	250	1000...1030 1000...1030	u, t z	52...56 50...55	550...700
Č. 4757	1100...850	800...830	250	1000...1040 1000...1040	u, t z	54...58 52...56	450...650
Č. 4758	1080...850	830...850	250	1000...1040 1000...1040	u, t z	60...63 59...62	450...600
Č. 5741	1050...850	670...700	250	830...870	u	57...61	400...700
Č. 5742	1050...850	670...700	250	830...870 860...900	u z	58...62 54...58	400...700
Č. 6450	1100...850	740...760	250	960...1000 1000...1040	v u	49...53 46...50	500...700
Č. 6451	1100...900	780...810	250	1080...1160 1080...1160	u, t z	47...53 42...47	550...700
Č. 7450	1050...900	780...830	250	1010...1050 1010...1050	t, u z	49...54 42...46	500...700
Č. 9750	1100...850	800...840	250	1020...1060 1020...1060	u, t z	49...53 42...46	550...700

* hl. – rashladno sredstvo: v – voda, u – ulje, t – termalna kupka, z – zrak.

Brzorezni čelici

Sastav i upotreba

Oznaka po JUS	Oznaka Željezarna Ravne	Sastav % C	W	Cr	Co	Mo	V	Upotreba
Č. 6880	BRW	0,75	18,0	4,0	–	–	1,1	standardni brzorezni čelik za sve vrste brzoreznog alata
Č. 6980	BRC	0,80	18,0	4,0	5,0	0,7	1,5	Co-brzorezni čelik za rezanje tvrdih materijala velikim brzinama s debelom strugotinom
Č. 7680	BRM 2	0,90	6,5	4,0	–	5,0	1,9	Mo-brzorezni čelik za obradu kovina pri većim udarnim opterećenjima, osobito za noževe i glodala (za grubu obradu)
Č. 9682	BRC 3	0,76	18,0	4,0	9,5	0,7	1,5	jako legirani Co-brzorezni čelik za najveća opterećenja i za rezanje najtvrđih materijala
Č. 9683	BRU	1,25	9,5	4,0	10,0	3,5	3,2	univerzalni brzorezni čelik najvećeg učinka pri finoj ili gruboj obradi
Č. 9780	BRC Mo	0,92	6,5	4,0	5,0	5,0	1,9	Co-Mo-brzorezni čelik za najtežu grubu obradu gdje se posebno zahtijeva žilavost
Č. 9880	OSV 1	1,5	6,5	4,5	5,0	3,5	5,0	vrlo opterećeni alat, probijači, glodala i noževi za obradu kovina

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje °C	Žarenje tvrdoća HB	Kaljenje* °C	Popuštanje °C	Popuštanje tvrdoća HRC
Č.6880	1150...900	800...830	300	1230...1290	530...560	63...65
Č.6980	1150...900	800...830	300	1260...1300	540...580	63...66
Č.7680	1100...900	780...810	300	1180...1230	530...560	63...66
Č.9682	1150...900	800...830	300	1250...1310	550...590	63...67
Č.9683	1100...900	800...860	300	1210...1250	540...570	64...67
Č.9780	1100...900	780...810	300	1200...1240	540...570	63...66
Č.9880	1100...900	870...900	300	1180...1260	480...520	62...65

* Gašenje u ulju, na zraku ili u termalnoj kupki (540...550 °C).

ČELIČNI LIJEV

Čelični lijev je svaki čelik dobiven postupkom u martenki, konverteru, taljici ili električnoj peći *i* lijevan u kalupe.

Ugljični (nelegirani) **čelični lijev** (JUS C.J3.011 – 1973)

Oznaka po JUS	Naprez. tečenja R_e N/mm² min.	Vlač. čvrst. R_m N/mm min.	Postot. produlj. A_5 % min.	Kon-trak. Z % min.	Žila-vost $KU/3$ J min.	Pokus savijanja (α=180°) D	Magn. indukcija T pri jakosti polja A/m 2500	5000	10000
ČL. 0300 **ČL. 0301**	185	375	25	35	– 34	– 2 *a*	1,45	1,60	1,75
ČL. 0400 **ČL. 0401**	225	440	22	30	– 27	– 3 *a*	1,40	1,55	1,70
ČL. 0500 **ČL. 0501**	255	510	18	25	– 21	– 4 *a*	1,35	1,55	1,70
ČL. 0600 **ČL. 0601**	295	590	15	–	– 14	– –	1,30	1,50	1,65
ČL. 0602 **ČL. 0603**	345	610	15	–	– 14	– –	–	–	–
ČL. 0700	410	685	12	–	–	–	–	–	–

Svi odljevci moraju biti toplo obrađeni i to: žarenjem na meko ili normaliziranjem ili normaliziranjem i žarenjem na meko.

Legirani čelični lijev za poboljšanje

Sastav

Oznaka po JUS	Oznaka Železarna Ravne	Sastav % C	Cr	Mo
ČL. 1330	Lg-C 25	0,20		
ČL. 4730	CrMo 60 L	0,25	1,0	0,25
ČL. 4731	CrMo 80 L	0,33	1,0	0,25
ČL. 4732	CrMo 100 L	0,42	1,0	0,25
ČL. 7130	LgŽ-45 Mo	0,21		0,40
ČL. 7431	GS17CrMo55	0,18	1,3	0,50

Mehanička svojstva (u poboljšanom stanju) *i upotreba*

Oznaka po JUS	Naprez. tečenja R_e N/mm² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. produlj. A_5 %	Upotreba
ČL. 1330	245	400 ... 590	22	ventili (do 450 °C)
ČL. 4730	390	590 ... 740	16	statički i dinamički opterećeni dijelovi
ČL. 4731	510	740 ... 890	12	
ČL. 4732	665	880 ... 1030	9	
ČL. 7130	245	440 ... 590	22	ventili (300 ... 540 °C)
ČL. 7431	315	490 ... 640	20	jače opterećeni dijelovi

Kemijski otporan čelični lijev

Sastav

Oznaka JUS	Oznaka Železarna Ravne	Sastav % C maks.	Si	Cr	Ni	Mo	ostalo
Nerđajući lijev							
ČL. 4171	Prokron 2 L	0,20		13,5			
ČL. 4571	Prokron 11 L	0,12	1,5	18,0	9,0		
ČL. 4572	Prokron 11 sp. L	0,08	1,0	18,0	10,0		+ Nb
ČL. 4573	Prokron 12 L	0,12	1,5	18,0	10,0	2,0	
ČL. 4574	Prokron 12 sp. L.	0,08	1,0	18,0	11,5	2,0	+ Nb
Vatrostalni lijev							
ČL. 4271	Prokron 10 L	0,45	1,7	29,0			
ČL. 4273	Prokron 16 L	1,3	1,7	29,0			
ČL. 4576	Prokron AS L	0,40	1,5	27,0	4,0		
ČL. 4577	Prokron 15 L	0,35	1,5	25,0	12,0		

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka JUS	Stanje	Naprez. tečenja R_e N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Upotreba
ČL. 4171	poboljš.	440	590 ... 790	12	otpornost prema rđi i kiselinama
ČL. 4571	gaš. (v)	175	440 ... 640	20	
ČL. 4572	gaš. (v)	175	440 ... 640	20	
ČL. 4573	gaš. (v)	185	440 ... 640	20	
ČL. 4574	gaš. (v)	185	440 ... 640	20	
ČL. 4271	žareno	Tvrdoća	200 ... 300 HB		dijelovi industrijskih peći
ČL. 4273	žareno		250 ... 330 HB		
ČL. 4576	žareno		200 ... 300 HB		u vatri do 1100 °C
ČL. 4577	gaš. (v)		150 ... 230 HB		u vatri do 1150 °C

Čelični lijev otporan prema habanju

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka JUS	Oznaka Železarna Ravne	Sastav % C	Mn	Cr	Mo	Ni	Svojstva čvrstoće*
ČL. 3134	2 Mn L	0,45	1,8				poboljš.: R_e = 390, A_5 = 7
ČL. 3160	V 12 Mn L	1,2	13,0				gašeno (u vodi): tvrdoća 200 HB
ČL. 3161	N 12 Mn L	1,0	12,0				
ČL. 3460	V 12 MnCr L	1,2	13,0	1,0			
ČL. 3462	12 MnCr L	1,2	13,0	1,8			
ČL. 7361	12 MnMo L	1,1	12,0		2,0		
ČL. 7362	V 12 MnMo L	1,3	12,0		2,0		
ČL. 4758	15-3 LC-L	2,6		15,0	2,8		kalj.: tvrd. 55 ... 60 HRC
ČL. 4759	15-3 HC-L	3,3		15,0	2,8		kalj.: tvrd. 60 ... 64 HRC
ČL. 4771	Prokron 3 M-L	0,30		17,0	0,6	1,6	poboljš.: R_e = 590, A_5 = 4

* R_e – granica naravnog tečenja (N/mm²), A_5 – postotno produljenje (%).

OZNAKE ČELIKA

Oznake čelika prema staudardima JUS i DIN

JUS	DIN	JUS	DIN
Č. 0000	St 00	Č. 0645	St 60-2
Č. 0145	St 10	Č. 0745	St 70-2
Č. 0146	U St 12, St 12	Č. 1100	—
Č. 0147	U St 13, R St 13	Č. 1101	—
Č. 0148	RR St 14	Č. 1120	C 10
Č. 0210	U St 35-2	Č. 1121	Ck 10
Č. 02t1	R St 35-2	Č. 1190	(10 S 20)
Č. 0245	U St 36-1	Č. 1202	H I
Č. 0246	(6 P 10)	Č. 1204	H II
Č. 0247	(U 7 S 10)	Č. 1206	H 1II
Č. 0255	U St 36-2	Č. 1209	—
Č. 0257	U 10 S 6	Č. 1210	—
Č. 0261	R St 34-2	Č. 1211	—
Č. 0265	UQ St 36-2	Č. 1212	St 35-4
Č. 0267	U 10 S 10	Č. 1213	St 45-4
Č. 0270	U St 34-1	Č. 1214	St 35-8
Č. 0271	U St 34-2	Č. 1215	St 45-8
Č. 0275	R St 36-2	Č. 1220	C 15
Č. 0345	U St 38-1	Č. 1221	Ck 15
Č. 0355	U St 38-2	Č. 1281	Cm 15
Č. 0361	R St 37-2	Č. 1290	15 S 20
Č. 0362	St 37-3	Č. 1300	—
Č. 0363	(St 37-3)	Č. 1301	—
Č. 0365	UQ St 38-2	Č. 1302	—
Č. 0370	U St 37-1	Č. 1330	C 22
Č. 0371	U St 37-2	Č. 1331	Ck 22
Č. 0375	R St 38-2	Č. 1400	—
Č. 0411	—	Č. 1402	St 55-4
Č. 0445	R St 44-2	Č. 1430	C 35
Č. 0446	(6 P 20)	Č. 1431	Ck 35
Č. 0460	R St 42-1	Č. 1480	Cm 35
Č. 0461	R St 42-2	Č. 1490	35 S 20
Č. 0462	St 42-3	Č. 1500	—
Č. 0463	(St 42-3)	Č. 1501	—
Č. 0471	U St 42-2	Č. 1502	—
Č. 0481	R St 46-2	Č. 1530	C 45
Č. 0482	St 46-3	Č. 1531	Ck 45
Č. 0483	(St 46-3)	Č. 1540	(C 45 W 3)
Č. 0545	St 50-2	Č. 1580	Cm 45
Č. 0561	(St 52-3)	Č. 1590	45 S 20
Č. 0562	St 52-3	Č. 1600	—
Č. 0563	(St 52-3)	Č. 1601	—

Oznake čelika prema standardima JUS i DIN (nastavak)

JUS	DIN	JUS	DIN
Č. 1630	C 55	Č. 4141	115 CrV 3
Č. 1631	Ck 55	Č. 4143	140 Cr 3
Č. 1680	Cm 55	Č. 4145	100 Cr 6
Č. 1700	—	Č. 4149	(140 Cr 2)
Č. 1701	—	Č. 4150	X 210 Cr 12
Č. 1730	C 60	Č. 4170	X 7 Cr 13
Č. 1731	Ck 60	Č. 4171	X 15 Cr 13
Č. 1740	(C 67 W 3)	Č. 4172	X 20 Cr 13
Č. 1741	(C 67 W 3)	Č. 4173	(X 40 Cr 13)
Č. 1780	Cm 60	Č. 4175	X 42 Cr 13
Č. 1840	(C 80 W 1)	Č. 4180	34 CrS 4
Č. 1940	(C 105 W 1)	Č. 4181	41 CrS 4
Č. 1941	100 W 1	Č. 4184	37 CrS 4
Č. 1943	(C 125 W)	Č. 4230	67 SiCr 5
Č. 1944	(C 125 W)	Č. 4270	X 45 CrSi 9 3
Č. 1946	(C 110 W 2)	Č. 4320	16 MnCr 5
Č. 1948	(C 135 W 2)	Č. 4321	20 MnCr 5
Č. 2130	(38 Si 7)	Č. 4381	16 MnCrS 5
Č. 2131	46 Si 7	Č. 4382	20 MnCrS 5
Č. 2132	51 Si 7	Č. 4520	17 CrNiMo 6
Č. 2133	55 Si 7	Č. 4531	34 CrAlNi 7
Č. 2134	66 Si 7	Č. 4570	X 22 CrNi 17
Č. 2330	(60 SiMn 5)	Č. 4571	X 12 CrNi 18 8
Č. 2331	(65 Si 7)	Č. 4572	X 10 CrNiTi 18 9
Č. 3100	St 52-4	Č. 4573	X 5 CrNiMo 18 10
Č. 3105	19 Mn 5	Č. 4574	X 10 CrNiMoTi 18 10
Č. 3111	—	Č. 4578	X 15 CrNiSi 25 20
Č. 3112	—	Č. 4579	X 12 CrNiSi 36 16
Č. 3130	40 Mn 4	Č. 4580	X 5 CrNi 18 9
Č. 3133	17 Mn 4	Č. 4581	X 80 CrNiSi 20
Č. 3134	50 Mn 7	Č. 4582	X 10 CrNiNb 18 9
Č. 3139	28 Mn 6	Č. 4583	X 10 CrNiMoNb 18 10
Č. 3160	(X 120 Mn 12)	Č. 4588	(X 53 CrMnNiN 21 9)
Č. 3190	—	Č. 4650	X 210 CrW 12
Č. 3811	—	Č. 4721	20 CrMo 5
Č. 3840	90 MnV 8	Č. 4730	25 CrMo 4
Č. 3990	9 SMn 28	Č. 4731	34 CrMo 4
Č. 4120	15 Cr 3	Č. 4732	42 CrMo 4
Č. 4130	34 Cr 4	Č. 4733	50 CrMo 4
Č. 4131	41 Cr 4	Č. 4734	30 CrMoV 9
Č. 4132	38 Cr 2	Č. 4738	32 CrMo 12
Č. 4133	46 Cr 2	Č. 4739	34 CrAlMo 5
Č. 4134	37 Cr 4	Č. 4750	X 165 CrMoV 12
		Č. 4751	X 38 CrMoV 5 1

Oznake čelika prema standardima JUS i DIN (nastavak)

JUS	DIN	JUS	DIN
Č. 4753	X 40 CrMoV 5 1	Č. 7480	20 MoCrS 4
Č. 4754	—	Č. 7481	25 MoCrS 4
Č. 4755	(X 50 CrMoW 9 11)	Č. 7680	S 6-5-2
Č. 4756	X 100 CrMoV 5 1	Č. 9682	S 18-1-2-10
Č. 4757	(X 50 CrVMo 5 1)	Č. 9683	S 10-4-3-10
Č. 4770	X 55 CrMo 14	Č. 9750	—
Č. 4771	—	Č. 9780	S 6-5-2-5
Č. 4781	—	ČL. 0300	GS-38
Č. 4782	42 CrMoS 4	ČL. 0301	GS-38.3
Č. 4811	—	ČL. 0400	GS-45
Č. 4830	50 CrV 4	ČL. 0401	GS-45.3
Č. 4831	58 CrV 4	ČL. 0500	GS-52
Č. 4835	31 CrV 3	ČL. 0501	GS-52.3
Č. 4850	(X 155 CrVMo 12 1)	ČL. 0600	GS-60
Č. 4970	X 10 CrAl 24	ČL. 0601	GS-60.3
Č. 4972	X 10 CrAl 13	ČL. 0602	GS-62
Č. 5420	15 CrNi 6	ČL. 0603	GS-62.3
Č. 5421	18 CrNi 8	ČL. 0700	GS-70
Č. 5430	36 CrNiMo 4	ČL. 1330	GS-C 25
Č. 5431	34 CrNiMo 6	ČL. 3134	(GS-36 Mn 5)
Č. 5432	30 CrNiMo 8	ČL. 3160	(G-X 120 Mn 12)
Č. 5741	55 NiCrMoV 6	ČL. 3161	(G-X 120 Mn 12)
Č. 5742	56 NiCrMoV 7	ČL. 3460	(G-X 120 Mn 12)
Č. 6440	105 WCr 6	ČL. 3462	(G-X 120 Mn 12)
Č. 6441	(110 WCrV 5)	ČL. 4171	G-X 20 Cr 14
Č. 6443	45 WCrV 7	ČL. 4271	G-X 40 CrSi 29
Č. 6444	60 WCrV 7	ČL. 4273	G-X 130 CrSi 29
Č. 6445	80 WCrV 8	ČL. 4571	G-X 10 CrNi 18 8
Č. 6450	X 30 WCrV 4 1	ČL. 4572	G-X 7 CrNiNb 18 9
Č. 6451	X 30 WCrV 9 3	ČL. 4573	G-X 10 CrNiMo 18 9
Č. 6840	120 WV 4	ČL. 4574	G-X 7 CrNiMoNb 18 10
Č. 6842	100 WV 4	ČL. 4576	G-X 40 CrNiSi 27 4
Č. 6850	(142 WV 13)	ČL. 4577	G-X 35 CrNiSi 25 12
Č. 6880	S 18-0-1	ČL. 4730	(GS-25 CrMo 4)
Č. 6980	S 18-1-2-5	ČL. 4731	(GS-34 CrMo 4)
Č. 7100	15 Mo 3	ČL. 4732	(GS-42 CrMo 4)
Č. 7400	13 CrMo 4 4	ČL. 4758	(G-X 300 CrMo 15 3)
Č. 7401	10 CrMo 9 10	ČL. 4759	—
Č. 7420	20 MoCr 4	ČL. 4771	—
Č. 7421	25 MoCr 4	ČL. 7130	GS-22 Mo 4
Č. 7431	22 CrMo 4 4	ČL. 7361	(G-X 125 MnMo 12 2)
Č. 7432	24 CrMoV 5 5	ČL. 7362	(G-X 125 MnMo 12 2)

Oznake domaćih i nekih stranih alatnih čelika*

JUS	Železarna Ravne	Böhler (Austrija)	Poldi (ČSSR)	GOST (SSSR) (ruska slova!)
Č. 1540	OC 50	MS 45; EMS 45	TSW extra	—
Č. 1740	OC 70	Extra weich	6	Y 7
Č. 1840	OC 80	Extra zäh	5	Y 8
Č. 1940	OC 100	Extra zäh hart 100	EZH	Y 11
Č. 1941	OC 100 extra	Extra S	EZH spec.	—
Č. 1943	OC 120	Extra zäh hart	FS	Y 12A
Č. 1944	OC 120 extra	Extra zäh hart	FS	—
Č. 1741	OCP 65	Prima weich	T 5 P	—
Č. 1946	OCP 110	Pr. mittel hart 115	K 2	—
Č. 1948	OCP 135	Prima hart	2	Y 13
Č. 4835	VCV 130	—	—	—
Č. 4141	OCR 1	CV; SSC	—	—
Č. 4143	OCR 3	—	RCR 1	—
Č. 4145	OCR 4 extra	K 150	KLZ	—
Č. 4149	OCR 3 extra	—	RCR 1	XO 5
Č. 4150	OCR 12	Spezial K	2002	X 12
Č. 4650	OCR 12 spec.	Spezial KR	2002 spec.	—
Č. 4750	OCR 12 extra	Spezial KNL	2002 M	X 12 M
Č. 6840	OW 1	WV; SSWY	—	B 1
Č. 6841	OW 3	—	SPS	—
Č. 6443	OSIKRO 2	MY extra	Tenax N	5 XB 2C
Č. 6444	OSIKRO 4	KL	Tenax NB	6 XB C
Č. 4751	Utop Mo 1	US ultra	TLH	—
Č. 5741	Utop extra 1	GNM	TBM 1	5 XHM
Č. 5742	Utop extra 2	GNME	TBM Extra 1	45 XHM Φ
Č. 6451	Utop 2	WKZ	HPS; 212	3 X 2B8
Č. 3840	Merilo	MST	Stabil spec.	—
Č. 6440	Merilo extra	Amutit	Solar	XBΓ
Č. 4172	Prokron 3	WKW 2	AK 2 spec.	2 X 13
Č. 4173	Prokron 4	—	—	—
Č. 4770	Prokron 5	WKW 4	AK 3 spec.	4 X 13
Č. 6880	BRW	Super Rapid Extra	Max. spec.	P 18
Č. 6882	BRW 2	S.R.E. HVN	Max. sp. Gex.	—
Č. 6980	BRC	S.R.E. 500	Max. spec. 55	P 18 K 5 Φ 2
Č. 7680	BRM 2	S.R.E. Mo	—	—
Č. 9682	BRC 3	CC	MK	PK 10
Č. 9683	BRU	Mo Rapid Ex. 500	—	—
Č. 9780	BRC Mo	Mo Rapid Ex. 1200	—	—

* Usporedba sličnih čelika je po kvaliteti samo približna.

TVRDI METALI

Tvrdi metali sastavljeni su od jednog ili više karbida kao nosilaca tvrdoće i od kobalta kao veziva.

Tvrdi metali nisu čelici i njihova se struktura ne može mijenjati nikakvom toplinskom obradom. Ne mogu se kovati ni valjati; oblikuju se samo lijevanjem odn. sinterovanjem i brušenjem.

1. **Lijevani tvrdi metali**

Pojavili su se najprije u USA pod nazivom »stellit«. Sastavljeni su na bazi Co (33...65%), Cr (25...32%) i W (6...17%) s približno 0...5% C te lijevani. Kasnije je bio Co – zbog visoke cijene – djelomice zamijenjen sa Fe. Svoju prirodnu tvrdoću zadržavaju do visokih temperatura (pri 750 °C mogu imati još tvrdoću do 750 HV). Veoma su otporni prema habanju, ali su krhki i vrlo osjetljiv prema udarcima. Upotrebljavamo ih za navarivanje.

2. **Sinterovani tvrdi metali**

Nastali su u Njemačkoj (Krupp, 1926) pod nazivom »widia«. Bitno su utjecali na razvoj tehnike obrade. Sastoje se od kristala WC, TiC (TaC, MoC) te Co kao veziva. TiC je tvrđi od WC, ali smanjuje žilavost. Sinterovani tvrdi metali oblikuju se u pločice, koje se sinteruju. Njihova tvrdoća, koja iznosi 1400...1750 HV, opada do 1000 °C tek za 10%. Sinterovani tvrdi metali sa TiC još su na 700 °C znatno tvrđi od brzoreznog čelika pri temperaturi okoline. Njihova je žilavost također znatna (čvrstoća na savijanje iznosi 2500...1250 N/mm^2). Tlačna čvrstoća je vrlo velika (oko 4250 N/mm^2).

Tvrdi metali za alat za preoblikovanje
(JUS K. A9. 025 – 1974)

Oznaka	Upotreba
G 05	velika otpornost prema habanju, manja žilavost; za matrice, mjerila
G 10	otpornost prema habanju; za matrice, vodice
G 20	otpornost prema habanju i dovoljna žilavost; matrice za izradu cijevi, profilirane matrice, matrice za duboko izvlačenje
G 30	alat za preoblikovanje i odvajanje čestica; za noževe u štancama, za pečatanje
G 40	za jednaki alat kao pri G 30, ali s povećanom žilavošću
G 50	alat za odvajanje čestica, savijanje, kovanje, prešanje (u hladnom i toplom stanju)
G 60	za jednaki alat kao pri G 50, ali s povećanom žilavošću

Tvrdi metali za alat za odvajanje čestica (JUS K.A9.020 – 1966)

Oznaka	Upotreba	
P 01	Odvajanje dugih čestica s čelika	Najfinije tokarenje i bušenje čelika velikom brzinom do 1,7 m/s (100 m/min) s posmakom od 0,1 mm/okr.
P 10		Odvajanje čestica s čelika šesterostrukom brzinom brzoreznih čelika s najmanjim posmacima do 1 mm/okr.
P 20		Odvajanje čestica s čelika četverostrukom brzinom brzoreznih čelika s osrednjim posmacima do 2 mm/okr.
P 30		Odvajanje čestica s čelika dvostrukom brzinom brzoreznih čelika s većim posmacima do 3 mm/okr. Blanjanje sivog lijeva.
P 40		Tokarenje i odvajanje čestica na automatima malom brzinom, ali s velikim presjekom strugotine.
P 50		Tokarenje i odvajanje čestica na automatima malom brzinom rezanja i velikim presjekom strugotine.
K 01	Odvajanje kratkih čestica s čelika, neželjeznih kovina i nekovina	Odvajanje čestica s tvrdog i sivog lijeva veće tvrdoće (do 60 HRC), aluminijskih slitina sa silicijem, kaljenog čelika, plastičnih masa, papira, keramike.
K 10		Odvajanje čestica s tvrdog sivog lijeva (nad 220 HB), tvrdog čelika (R_m > 1800 N/mm^2), slitina Al i Cu, plastičnih tvari, stakla, porculana i kamenja.
K 20		Odvajanje čestica sa sivog lijeva (nad 220 HB), slitina Al i Cu, plastičnih tvari, keramike i kamenja. Vruće i hladno vučenje i valjanje.
K 30		Odvajanje čestica sa sivog lijeva i čelika manje čvrstoće, ukočenih drvenih ploča i sl.
K 40		Odvajanje čestica s drveta, vlaknastih tvari, keramike i kamenja (udarna svrdla). Matrice za vučenje tvrdog čelika.
M 10	Odvajanje čestica s čelika, sivog lijeva i nekovina	Odvajanje čestica velikom brzinom s malim presjekom strugotine. Obrada tvrdog Mn-čelika.
M 20		Odvajanje čestica osrednjom brzinom s osrednjim presjekom strugotine. Obrada tvrdog Mn-čelika i austenitnih čelika.
M 30		Odvajanje čestica malom brzinom s većim presjecima strugotine. Obrada austenitnih čelika.
M 40		Odvajanje čestica s čelika male čvrstoće, osobito na automatima. Obrada neželjeznih kovina

LAKE KOVINE

Aluminij

(JUS C.C2.100 – 1986)

Osobite prednosti aluminija su mala gustoća i velika otpornost prema koroziji i kemijskim utjecajima. Aluminij ima također veliku toplinsku i električnu vodljivost.

Sastav i upotreba

Oznaka	Dopuštene nečistoće (%) maks.									
	ukupno	Cu	Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Ga	ostalo
Al 99.8.00	0.2	0.03	0.02	0.15	0.15	0.06	0.02	0.02	0.03	0.02
Al 99.7.00	0.3	0.03	0.03	0.20	0.25	0.07	0.03	0.03		0.03
Al 99.5.00	0.5	0.05	0.05	0.25	0.40	0.07	0.05	0.05		0.03
Al 99.3.00	0.7	0.05	0.05	0.7	0.7	0.10	0.05	0.05		0.05
Al 99.0.00	1.0	0.05	0.05	0.5	0.8	0.10	0.10	0.05		0.04

Gustoća aluminija iznosi od 2560 kg/m^3 (lijevanog) do 2750 kg/m^3 (kovanog, valjanog ili vučenog).

Mehanička svojstva aluminija (Al 99,5)

Stanje aluminija	Vlač. čvrst. R_m N/mm^2	Postot. produlj.		Tvrdoća HB
		A_{10}	A_5	
lijev	90...120	25...18	–	24...32
trake i limovi				
– meki (žareni)	70	22	25	20
– polutvrdo valjani	100	6	7	30
– tvrdo valjani	130	4	5	35
šipke, žice, cijevi i profili				
– meki (prešani ili žareni)	70	18	20	20
– polutvrdo vučeni	100	5	7	28
– tvrdo vučeni	130 (... 170)	3	4	35

Najbolja svojstva u meko žarenom stanju dobivamo, ako nakon što veće plastične deformacije (70...90% smanjenja presjeka) žarimo Al pri 360...400 °C. Najveću kemijsku otpornost postižemo žarenjem pri 450...500 °C.

*

Žice za aluminijsku užad moraju imati postotno produljenje > 2%. Pojedina se žica prije pletenja ispituje na pregib i torziju.

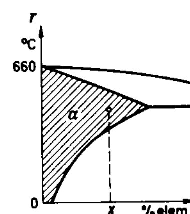
Aluminijske slitine

Aluminijske slitine imaju stanovite prednosti pred čistim aluminijem, i to u pogledu čvrstoće i sposobnosti za lijevanje i gnječenje. Neke aluminijske slitine dosežu svojom znatnom čvrstoćom svojstva čelika.

K a l j e n j e   a l u m i n i j s k i h   s l i t i n a

Aluminijske slitine na bazi AlCu, AlCuNi, AlCuMg i AlMgSi mogu se kaliti (očvršćivati), što im daje svojstva čvrstoće slična onima čelika.

Kaljenje (očvršćivanje) aluminijskih slitina se osniva na promjenljivoj topljivosti stanovitih elemenata (npr. Cu, Si, Mg itd.) u aluminiju. Aluminij može u području oko 500 °C dobro otapati te elemente, dok mu je sposobnost za otapanje na nižim temperaturama neznatna. Ako krutu otopinu pri 500 °C brzo ohladimo, otopljeni se elementi ne mogu pravovremeno izlučiti, pa ostaju u prezasićenoj otopini. Kad se višak otopljenih elemenata s vremenom izluči u kristalnim zrncima ili među njima, slitina postaje znatno čvršća (starenje).



x = dodatni element
α = kruta otopina

Kaljenje (očvršćivanje) aluminijskih slitina postižemo dakle žarenjem (4...6 h) pri temperaturi određenoj za svaku slitinu (oko 500...570 °C) i gašenjem u vodi te naknadnim starenjem. Starenje je kod nekih slitina (npr. AlCuMg) prirodno — pri okolnoj temperaturi, u drugih pak (npr. AlMgSi) umjetno — pri povišenoj temperaturi (8...15 h pri 100...200 °C). Kaljene slitine imaju mnogo bolja svojstva čvrstoće i mogu se upotrebljavati pri temperaturama do 120 °C. Kaljene se slitine omekšavaju pri 360...400 °C.

Aluminijske slitine sa Cu slabo su otporne prema koroziji.

Primjeri poznatijih t r g o v a č k i h   n a z i v a aluminijskih slitina

Naziv	Sastav (%) Al +
antikorodal	2,0 Si, 0,7 Mg, 0,6...0,8 Mn, 0,1...0,2 Ti
duralumin	3...4,5 Cu, 0,2...0,7 Si, 0...1,6 Mg, 0...1,2 Mn
duralumin K	0,5...2 Mg, 0,3...1,5 Si, 0...1,5 Mn
duralumin W	3,5...4,5 Cu, 1,8...2,2 Ni, [illegible]...1,8 Mg
duranalij	2,5...9 Mg, 0,3...0,6 Mn
duranalij 2S	2...2,5 Mg, 1...2 Mn
hidronalij	3...12 Mg, 0,2...1 Si, 0,2...0,5 Mn
silal	1,5...4,4 Cu, 0,6...1,2 Mg, 0,6...1 Mn, 0,3...0,6 Si, ...0,1 Ti
silal K	1,5 Mn, 0...0,5 Mg
silal V	0,8...1,5 Mg, 0,5...1 Mn, 0,3...0,7 Si, 0,3 Ti
silumin	12...13,5 Si, 0,3...0,45 Mn
silumin γ	12,25...12,75 Si, 0,35...0,65 Mn, 0,25...0,35 Mg

Aluminijske slitine za gnječenje
(JUS C.C2.100 – 1986)

Sastav (%)*

Oznaka (ISO)**	Al + Cu	Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Cr	Ti + Zr
Al Mn 1	— 0,1	— 0,3	— 0,6	— 0,7	— 0,2	0,8 1,5	— 0,10	— 0,20
Al Mn 1 Cu	0,05 0,20		— 0,6	— 0,7	— 0,2	1,0 1,5	— 0,10	— 0,20
Al Mg 1	— 0,20	0,5 1,1	— 0,4	— 0,7	— 0,2	— 0,2	— 0,1	— 0,2
Al Mg 2	— 0,10	1,7 2,4	— 0,5	— 0,5	— 0,2	— 0,5	— 0,35	— 0,2
Al Mg 3	— 0,10	2,6 3,5	— 0,5	— 0,5	— 0,2	— 0,4	— 0,35	— 0,2
Al Mg 4	— 0,10	3,5 4,6	— 0,5	— 0,5	— 0,2	— 0,8	— 0,35	— 0,2
Al Mg 5	— 0,10	4,5 5,6	— 0,5	— 0,5	— 0,2	— 0,5	— 0,35	— 0,2
Al Mg 3 Mn	— 0,10	2,4 3,4	— 0,5	— 0,5	— 0,2	0,3 1,0	— 0,25	— 0,2
Al Si 1 Mg	— 0,10	0,6 1,4	0,6 1,6	— 0,5	— 0,2	0,4 1,0	— 0,35	— 0,2
Al Mg Si 0,5	— 0,10	0,4 0,9	0,3 0,7	— 0,5	— 0,2	— 0,3	— 0,10	— 0,2
Al Mg 1 Si Cu	0,15 0,40	0,8 1,2	0,4 0,8	— 0,7	— 0,25	— 0,15	0,15 0,35	— 0,2
Al Cu 2 Mg	2,0 3,0	0,2 0,5	— 0,8	— 0,7	— 0,2	— 0,2	— 0,1	— 0,2
Al Cu 4 Mg Si	3,5 4,7	0,3 1,2	0,2 0,8	— 0,7	— 0,5	0,3 1,0		
Al Cu 4 Mg 1	3,8 4,9	1,0 1,8	— 0,5	— 0,5	— 0,2	0,3 1,2		
Al Cu 4 Si Mg	3,8 5,0	0,2 0,8	0,5 1,2	— 0,7	— 0,2	0,3 1,2		

* Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti sadržaja. – ** Uzete su u obzir samo neke značajnije slitine, dok su druge sadržane u gore navedenom standardu.

Mehanička svojstva i upotreba nekih aluminijskih slitina za gnječenje (prosječne vrijednosti)

Oznaka	Stanje*	**Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²**	**Vl. čvrst. R_m N/mm²**	Postot. prod. A_{10} %	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB	Smjernice za upotrebu
Al Mn 1	meko žareno polutvrdo tvrdo	40 100 120	90 120 150	18 5 3	20 6 4	22 35 42	otporna prema koroziji, dobro se zavaruje
Al Mg 2	meko žareno polutvrdo tvrdo	80 140 180	180 230 260	13 7 3	15 8 4	45 55 65	otporna prema koroziji (morske vode)
Al Mg 3	meko žareno polutrdo tvrdo	80 140 180	180 230 260	14 8 3	16 9 4	42 65 75	veća otpornost prema koroziji (i u morskoj vodi); s porastom % Mg smanjuje se sposobnost zavarivanja
Al Mg 4	meko žareno polutvrdo tvrdo	100 160 220	230 270 310	14 7 3	16 9 4	52 72 85	
Al Mg 5	meko žareno polutvrdo	130 200	240 340	14 7	16 8	65 90	
Al Si 1 Mg	meko žareno tvrdo kaljeno – h. kaljeno – t.	50 150 100 210	110 170 200 290	14 3 11 8	17 4 13 10	35 55 60 80	dobro se kali, otporna prema koroziji
Al Cu 4 Si Mg	meko žareno tvrdo kaljeno – h. kaljeno – h.–g.	80 220 260 320	180 280 400 450	10 2 10 2	12 3 12 3	70 75 100 120	vrlo dobro se kali, prema koroziji neotporna
Al Cu 5 Pb Bi	kaljeno – h.	250	380	10	12	100	za automate

* h. – stareno pri temperaturi okoline (hladno), t. – stareno pri povišenoj temperaturi (toplo), g. – hladno gnječeno.

Prešane aluminijske slitine za gnječenje imaju približno jednaka mehanička svojstva kao u meko žarenom stanju.

Aluminijske slitine za lijevanje (JUS C.C2.300 – 1983)

Sastav (%)*

Oznaka	Al +					Nečistoće (maks.)		
	Si	Cu	Mg	Ti	Mn	Fe	Zn	druge
Slitine za lijevanje u pijesak ili kokilu								
Al Si 12 00	11,0 13,5	(0,05)	(0,05)	(0,15)	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Si 12 Cu 00	11,0 13,5	0,1 1,2	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	0,8	0,5	1)
Al Si 8 Cu 3.00	7,5 9,5	2,0 3,5	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	0,8	1,2	2)
Al Si 6 Cu 4 00	5,0 7,5	3,0 5,0	0,1 0,3	(0,15)	0,01 0,6	1,0	2,0	3)
Al Si 10 Mg .00	9,0 11,0	(0,05)	0,2 0,5	(0,15)	0,01 0,4	0,5	0,10	
Al Si 5 Mg 00	5,0 6,0	(0,05)	0,4 0,8	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 5 Si .00	0,9 1,5	(0,05)	4,5 5,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 3 Si 1.00	0,9 1,3	(0,05)	2,5 3,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 3.00	(0,5)	(0,05)	2,5 3,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,3	0,10	
Al Cu 4 Mg Ti .00	(0,18)	4,2 4,9	0,15 0,3	0,15 0,30	(0,05)	0,20	0,07	
Slitine za tlačno lijevanje								
Al Si 12 (Fe) 00	11,0 13,5	(0,10)	(0,1)	(0,15)	0,01 0,4	1,3	0,10	
Al Si 12 Cu (Fe) .00	11,0 13,5	0,1 1,2	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	1,3	0,8	1)
Al Si 8 Cu 3 (Fe) .00	7,5 9,5	2,0 3,5	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	1,5	2,0	2)
Al Si 6 Cu 4 (Fe) .00	5,0 7,5	3,0 5,0	0,1 0,3	(0,15)	0,3 0,6	1,3	2,0	3)
Al Si 10 Mg (Fe) 00	9,0 11,0	(0,05)	0,2 0,5	(0,15)	0,01 0,4	1,3	0,2	
Al Mg 10.00	0,1 2,5	(0,05)	8,0 10,5	(0,15)	0,2 0,5	1,0	0,10	

* Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti – U zagradama su najveće dozvoljene vrijednosti sastavina kao nečistoća. – 1) 0,2 Ni; 0,2 Pb; 0,1 Sn. – 2) 0,3 Ni; 0,2 Pb; 0,1 Sn; – 3) 0,3 Ni; 0,3 Pb; 0,1 Sn.

Mehanička svojstva i upotreba slitina za lijevanje u pijesak ili kokilu

Oznaka*	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB	Upotreba
Al Si 12 .01 63 02 64	70...100 80...110 80...110 80...110	160...210 160...210 180...240 180...240	5 ...10 6 ...12 6 ...12 6 ...12	45... 60 50... 60 50... 60 50... 60	tanke stijenke odljevaka, dobra kemijska otpornost
Al Si 12 Cu .01 02	80...100 90...120	150...220 180...260	1 ... 4 2 ... 4	50... 65 50... 75	**tanke stijenke, kem. manje otporan**
Al Si 8Cu 3.01 02	100...150 100...160	160...200 170...220	1 ... 3 1 ... 3	65... 90 70...100	**više temperature**
Al Si 6 Cu 4.01 02	100...150 120...180	160...200 180...240	1 ... 3 1 ... 3	60... 80 70...100	**više temperature**
Al Si 10. Mg .01 81 02 82	80...100 180...260 90...120 210...280	170...220 200...320 180...240 240...320	2 ... 6 1 ... 4 2 ... 6 1 ... 4	50... 60 80...100 60... 80 85...115	veća tvrdoća, za motore, prehrambena industrija
Al Si 5 Mg .01 61 81 02 62 82	100...130 150...180 220...290 120...160 160...190 240...290	140...180 180...250 240...300 160...200 210...270 260...320	1 ... 3 2 ... 5 0,5... 2 1,5... 4 2 ... 8 1 ... 3	55... 70 70... 85 80...110 60... 75 70... 90 90...100	za motore, prehrambena industrija
Al Mg 5 Si .01 02	110...130 110...150	160...200 180...240	2 ... 4 2 ... 5	60... 75 65... 85	**otpornost prema morskoj vodi**
Al Mg 3 Si 1.01 81 02 82	80...100 120...160 80...100 120...180	140...190 200...280 150...200 220...300	3 ... 8 2 ... 8 4 ...10 3 ...10	50... 60 65... 90 50... 65 65... 90	**više temperature, dekorat. dijelovi**
Al Mg 3.01 02	70...100 70...100	140...190 150...200	3 ... 8 5 ...12	50... 60 50... 60	otpornost prema mor. vodi, dekorativni dijelovi
Al Cu 4 Mg Ti .61 81 62 82	220...280 240...350 220...300 260...380	300...400 350...420 320...420 350...440	5 ...15 3 ...10 8 ...18 3 ...12	90...115 95...125 95...115 100...130	**za dijelove s velikom tvrdoćom**

* Dodatne oznake znače:
01–lijevano u pijesak, 02–lijevano u kokilu;
61–lijevano u pijesak, 62–lijevano u kokilu } i kaljeno (učvršćivano) s prirodnim staranjem,
63–lijevano u pijesak, 64–lijevano u kokilu } i meko žareno ie gašeno,
81–lijevano u pijesak, 82–lijevano u kokilu } i kaljeno s naravnim staranjem.

Mehanička svojstva i upotreba aluminijskih slitina za tlačni lijev

Oznaka*	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB	Upotreba
AlSi12.05 AlSi12(Fe).05	140...180	220.. 280	1 ...3	60... 80	tanke stijenke, dobra kem. otpor.
AlSi12Cu.05 AlSi12Cu(Fe).05	140...220	220...300	–	60... 80	tanke stijenke, slaba kem. otpor.
AlSi8Cu3.05 AlSi8Cu3(Fe).05	160...240	240.. 310	0,5 ..3	70...100	više temperat., šira upotreba
AlSi6Cu4.05 AlSi6Cu4(Fe).05	150...220	220...300	0,5 ..3	80...110	više temper., šira upotreba
AlSi10Mg.05 AlSi10Mg(Fe).05	140...200	220. .300	1...3	70... 90	motori, prehram. industrija
AlMg10.05	140...220	220. .300	1...5	70...100	kem. otpornost, dekor. djelovi

* Dodatna oznaka 05 znači tlačni lijev.

Magnezijske slitine

Sam magnezij je premekan za neposrednu upotrebu. Potrebnu čvrstoću dobiva tek legiranjem. Magnezijske se slitine odlikuju osobito malom gustoćom, oko 1800 kg/m³. Prema koroziji nisu naročito otporne.

»Elektron« je zajednički naziv za više magnezijskih slitina koje osim Mg sadrže uglavnom do 10% Al, do 4,5% Zn, do 2,2% Mn i do 1,5% Si.

Magnezijske slitine za gnječenje (DIN 1729/1 – 1982)

Sastav i upotreba

Oznaka DIN	Sastav %* Mg +			Dopuštene nečistoće %, maks.	Smjernice za upotrebu
	Al	Zn	Mn		
Mg Mn 2	–	–	1,2 2,0	0,1 Si 0,05 Cu	otporna prema koroziji, dobro se zavaruje
Mg Al 6 Zn	5,5 7,0	0,5 1,5	0,15 0,4	0,1 Si 0,1 Cu	djelomice se može zavarivati
Mg Al 8 Zn	7,8 9,2	0,2 0,8	0,12 0,3	0,1 Si 0,05 Cu	može se kaliti (očvrstiti)

* Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti sadržaja.

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprez teč. $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postotno produljenje		Tvrdoća HB
			A_5	A_{10}	
Mg Mn 2	100...160	200...220	1,5... 2	1,5... 2	40
Mg Al 6 Zn	160...190	270...280	6...10	8...11	55

Magnezijske slitine za lijevanje (DIN 1729/2 – 1973)

Oznaka i sastav

Oznaka DIN*	Sastav %					
	Al	Zn	Mn	nečistoće (maks.)		
				Si	Cu	ostale
G – Mg Al 8 Zn 1 **GK – Mg Al 8 Zn 1** **GD – Mg Al 8 Zn 1**	7,5... 9,0	0,3.. 1,0	0,15...0,3	0,30	0,20	0,20
G – Mg Al 9 Zn 1 **GK – Mg Al 9 Zn 1** **GD – Mg Al 9 Zn 1**	8,3...10,0	0,3...1,0	0,15 ..0,3	0,30	0,20	0,20
G – Mg Al 9 Zn 2 **GK – Mg Al 9 Zn 2** **GD – Mg Al 9 Zn 2**	7,5...9,5	0,5...2,0	0,15 ..0,3	0,50	0,35	0,20

* Početni dijelovi oznaka znače: G – lijevanje u pijesak, GK – lijevanje u kokilu, GD – tlačni lijev.

Mehanička svojstva

Oznaka DIN	Način lijevanja*	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna. čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. A_5	Tvrdoća HB	Dinam. čvrst. na savij.** ± N/mm²
G – Mg Al 8 Zn 1	p	90...120	160...220	2...6	50.. 65	70...90
GK – Mg Al 8 Zn 1	k	90...120	160.. 220	2. .6	50.. 65	70...90
GD – Mg Al 8 Zn 1	t	140...160	200...240	1...2	60...85	50 ..60
G – Mg Al 9 Zn 1	p h	110.. 130	240...280	6...10	55...70	80...100
	p u	140...150	240...280	2. .4	65.. 90	80...100
GK – Mg Al 9 Zn 1	k h	110...130	240...280	6...10	55...70	80...100
	k u	140...150	240...280	2...4	65...90	80...100
GD – Mg Al 9 Zn 1	t	150...170	220...250	0,5...1,5	65...85	40...50
G – Mg Al 9 Zn 2	p	90...130	160...220	2...5	50.. 70	70...90
GK – Mg Al 9 Zn 2	k	90...130	160...220	2. .5	50...70	70 . 90
GD – Mg Al 9 Zn 2	t	140...170	200...250	0,5...2	60 ..85	40 ..50

* p – lijevano u pijesak, k – lijevano u kokilu, t – tlačni lijev; h – homogenizirano, u – toplo učvrsnuto.

** Pri $50 \cdot 10^6$ titraja.

BAKAR I BAKRENE SLITINE

Bakar

Katodni bakar je elektrolitički rafinirani (na katodi izlučeni) bakar, namijenjen u prvom redu za pretaljivanje u elektrolitski bakar.

S obzirom na način rafiniranja razlikujemo:

- *talionički bakar,* dobiven pirometalurškom rafinacijom
- *elektrolitski bakar,* dobiven pretaljivanjem katodnog bakra.

S obzirom na kisik u bakru razlikujemo:

- *bakar bez kisika,* taljen u zaštitnoj atmosferi ili vakuumu,
- *bakar s kisikom,* taljen u oksidacijskoj atmosferi,
- *dezoksidirani bakar,* dobiven upotrebom kovinskih ili nekovinskih dezoksidanata.

Standardne vrste bakra (JUS C.D1.002 – 1986)

Oznaka	Sastav* (%) Cu min.	O	P	Napomena
Katodni bakar				
EK1-Cu	99,99			za katode
EK2-Cu	99,95			
Bakar bez kisika				
EB1-Cu	99,99	0,001		elektrolitski bakar
EB2-Cu	99,95			
Bakar s kisikom				
ET1-Cu	99,90	0,005 ... 0,04		elektrolitski bakar
ET2-Cu	99,90	0,005 ... 0,04		talionički bakar
T1-Cu	99,90	0,005 ... 0,08		za lijevanje
T2-Cu	99,70	... 0,01		
Dezoksidirani bakar				
ED-Cu	99,90		0,003	elektrolitski bakar
DNP-Cu	99,90		0,005 ... 0,014	s malo P
DVP1-Cu	99,90		0,015 ... 0,04	s mnogo P
DVP2-Cu	99,70		0,015 ... 0,05	

* Za elektrotehnički bakar nije odlučan kemijski sastav (EB1-Cu, EB2-Cu, ET1-Cu, ET2-Cu in ED-Cu), već samo električna vodljivost (u mekom stanju, pri 20 °C: najmanje 58 m/Ω mm²).

Mehanička svojstva bakra

Stanje	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Post. prod. A_5 %	Tvrdoća HB
meko	210 ... 250	> 38	40 ... 60
polutvrdo	250 ... 300	> 10	60 ... 90
tvrdo	> 300	> 6	> 90

Bakrene slitine za gnječenje
(JUS C.D2.100 – 1982)

Slitine bakra s cinkom (»Mjedi«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav % Cu	Zn	nečistoće (maks.)
Cu Zn 5.00	94,0 ... 96,0	ostatak	0,2 Ni ostale ukupno 0,3 (Al, Fe, Mn, Pb, Sn, Sb)
Cu Zn 10.00	89,0 ... 91,0		
Cu Zn 15.00	84,0 ... 86,0		
Cu Zn 20.00	79,0 ... 81,0		
Cu Zn 28.00	69,0 ... 73,0		
Cu Zn 30.00	69,0 ... 71,0		
Cu Zn 33.00	66,0 ... 68,5		
Cu Zn 36.00	63,4 ... 65,0		
Cu Zn 37.00	62,0 ... 64,5		0,3 Ni, 0,1 ... 0,2 Pb ostale ukupno 0,5
Cu Zn 40.00	59,0 ... 61,5		

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) i smjernice za upotrebu

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. R_m N/mm²	% prod. A_{10} %	A_5 %	Tvrdoća HB	Smjernice za upotrebu
Cu Zn 10.00	meka	250	40	–	55	instalacijski djelovi za elektrotehniku, ukrasni predmeti
	polutvr.	320	30	–	70	
	tvrda	400	15	–	90	
Cu Zn 15.00	meka	250	40	–	55	
	polutvr.	320	30	–	70	
	tvrda	400	15	–	90	
Cu Zn 20.00	meka	260	40	–	55	cijevi za manometre, instalacijski dijelovi za elektrotehniku, ukrasni predmeti
	polutvr.	330	30	–	70	
	tvrda	420	15	–	90	
Cu Zn 28.00	meka	250	40	45	50	vrlo dobra za hladno oblikovanje, može se platirati čelikom, cijevi, duboke posude
	polutvr.	320	30	32	70	
	tvrda	380	18	20	90	
Cu Zn 30.00	meka	260	40	45	52	
	polutvr.	340	24	26	80	
	tvrda	430	12	14	100	
Cu Zn 33.00	meka	280	40	45	55	povećana sposobnost za hladno oblikovanje, žičane mreže, cijevne zakovice, vijci
	polutvr.	380	15	18	90	
	tvrda	500	5	6	115	
Cu Zn 37.00	meka	290	45	48	60	najvažnija slitina za hladno oblikovanje (vučenje, valjanje, prešanje); vijci, cijevi
	polutvr.	350	25	28	75	
	tvrda	410	15	17	95	
Cu Zn 40.00	meka	340	30	33	70	za toplo i hladno oblikovanje; dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvr.	410	15	18	95	
	tvrda	480	10	12	125	

Slitine bakra s cinkom i olovom
(»Mjedi s olovom«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav % Cu	Pb	Zn	nečistoće (maks.) Ni	ostale
Cu Zn 36 Pb 1,5.00	62,0 . . . 64,0	0,7 . . . 2,5	ostatak	0,3	0,5
Cn Zn 36 Pb 3 .00	60,0 . . . 62,0	2,5 . . . 3,5		0,3	0,5
Cu Zn 38 Pb 1,5.00	59,5 . . . 61,5	1,5 . . . 2.5		0,3	0,5
Cn Zn 39 Pb 2 .00	57.0 . . . 59,0	1,5 . . . 2.5		0,3	1.0
Cu Zn 39 Pb 3 .00	57,0 . . . 59,0	2,5 . . . 3,5		0,5	1,0
Cu Zn 44 Pb 2 .00	53,5 . . . 56,0	1,0 . . . 2.5		0,5	1.0

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) *i smjernice za upotrebu*

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. % A_{10}	A_5	Tvrdoća HB	Smjernice za upotrebu
Cu Zn 36 Pb 3.00	meka	340	30	33	70	za toplo i hladno oblikovanje,
	polutvr.	410	15	18	95	dijelovi za prešanje u toplom
	tvrda	480	10	12	125	stanju
Cu Zn 39 Pb 2.00	meka	370	25	28	75	najvažnija slitina za oblikova-
	polutvr.	440	10	12	105	nje odvajanjem čestica (slit. za
	tvrda	510	5	6	125	automate), razni dijel. strojeva

Posebne slitine bakra s cinkom
(»Posebne mjedi«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav % Cu	Al	Mn	ostalo
Cu Zn 20 Al 2.00	76.0 . . . 79,0	1,8 . . . 2,3	–	0,02 . . . 0,035As
Cu Zn 28 Sn 1.00	70,0 . . . 73,0	–	–	0,9 . . . 1,3 Sn[1]
Cu Zn 31 Si 1.00	66,0 . . . 70,0	–	–	0,7 . . . 1,3 Si
Cu Zn 35 Ni 2,5.00	58,0 . . . 61,0	0,3 . . . 1,5	1,5 . . . 2,5	2,0 . . . 3,0 Ni
Cu Zn 38 Sn 1.00	59,5 . . . 63,5	–	–	0,7 . . . 1,4 Sn
Cu Zu 40 Al 1.00	56,5 . . . 59,5	0,4 . . . 1,6	0,4 . . . 1,8	–
Cu Zn 40 Al 2.00	55,5 . . . 59,0	1,3 . . . 2,3	1,0 . . . 2,4	–
Cu Zu 40 Ni 2.00	56,0 . . . 58,0	0,5 . . . 1,0	–	1,0 . . . 2,0 Ni
Cu Zn 40 Mn 2.00	57,0 . . . 59,0	–	1,0 . . . 2,5	–
Cu Zn 38 Al 2 Mn 3 Ni.00	61,0 . . . 63,0	2,0 . . . 3,0	3,0 . . . 4,0	0,3 . . . 0,5 Ni[2]
Cu Zn 39 Al Fe Mn.00	56,0 . . . 61,0	0,2 . . . 1,5	0,2 . . . 2,0	0,2 . . . 1,5 Fe

[1] Također 0,02 . . . 0,035 As. – [2] Također 0,3 . . . 0,7 Fe.

Slitine bakra s kositrom
(»Kositrena bronca«)

Oznaka, sastav i upotreba

Oznaka	Sastav % Sn	P	Cu	Upotreba
Cu Sn 2.00	1,0 . . 2,5	0,01 . . 0,4	ostatak	vijci, opruge, za elektr. vodljive opruge
Cu Sn 6.00	5,5 . . . 7,5	0,01 . . . 0,4		opruge, savitljive cijevi za manometre, mreže za sita
Cu Sn 8.00	7,5 . . . 9,0	0,01 . . . 0,4		opruge, cijevi veće otpornosti prema habanju i koroziji

Slitine bakra s kositrom i cinkom
(»Crvena kovina«)

Oznaka, sastav i upotreba

Oznaka	Sastav % Sn	Zn	Pb	P maks.	Cu	Upotreba
Cu Sn 4 Zn 4.00	3,0 . . . 5,0	3,0 . . . 5,3	–	0,1	ostatak	za manometarske opruge
CuSn4Pb4Zn4.00	3,0 . . 5,0	3,0 . . . 5,0	3,0 . . . 5,0	0,4		za klizne ležaje

Slitine bakra s aluminijem
(»Aluminijske bronce«)

Oznaka, sastav i upotreba

Oznaka	Sastav % Al	Mn	Ni	As, Fe	Cu	Upotreba
				As		
Cu Al 5.00	4,0 . . . 6,0	0,0 . . . 0,3	0,0 . . . 0,8	–	ostatak	za kočne pojase, prigušivače oscilacija
Cu Al 5 As.00	4,0 . . . 6,0	–	–	0,0 . . . 0,8		
Cu Al 8.00	7,0 . . . 9,0	0,0 . . . 0,5	0,0 . . . 0,5	–		otpor. prema sump. i oct. kiselini
				Fe		
Cu Al 8 Fe 3.00	6,5 . . . 8,5	0,0 . . . 0,8	0,0 . . . 0,8	1,5 . . . 3,5		velika čvrstoća (i na povišenoj temper.), otpornost prema kiselinama i mor. vodi te vatri
Cu Al 10 Fe 3.00	8,5 . . 11,0	1,5 . . . 3,5	0,0 . . . 1,0	2,0 . . . 4,0		
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.00	8,5 . . . 11,5	0,0 . . . 1,5	4,0 . . . 6,0	2,0 . . . 8,0		
Cu Al 9 Mn 2.00	8,0 . . . 10,0	1,5 . . . 2,5	–	–		

Slitine bakra s niklom (»Niklena bronca«)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %				Upotreba
	Ni	Fe	Mn	Cu	
Cu Ni 5 Fe 1 Mn .00	4,0... 6,0	1,0...1,5	0,3...0,8	ostatak	za cijevi i aparate
Cu Ni 10 Fe 1 Mn .00	9,0...11,0	1,0...2,0	0,3...1,0	ostatak	osobita otp. prema eroziji, koroziji i kavit.
Cu Ni 20.00	19,0...22,0	–	0,0...0,5	ostatak	sposobnost za duboko izvlačenje, platiranje
Cu Ni 20 Mn 1 Fe .00	19,0...22,0	0,4...1,0	0,5...1,5	ostatak	za kondenzator. cijevi
Cu Ni 25.00	24,0 ..26,0	–	0,0...0,5	ostatak	za kovani novac i platiranje
Cu Ni 30 Mn 1 Fe .00	29,0...32,0	0,4...1,0	0,5...1,5	ostatak	velika otp. prema eroziji, koroziji i kavit.
Cu Ni 44 Mn 1.00	43,0...45,0	–	0,5...2,0	ostatak	sposobnost oblikovanja, lako oksidira

Slitine bakra s niklom i cinkom (»Novo srebro«)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %				Upotreba
	Cu	Ni	Pb	Zn	
Cu Ni 10 Zn 27.00	61,0. .65,0	8,0...11,0	–	ostatak	dobro se lijeva i preša; za unut. arhitekturu
Cu Ni 10 Zn 42 Pb 2.00	45,0...48,0	9,0...11,0	0,5...2,0	ostatak	dobro se preša i kuje, za opću upotrebu
Cu Ni 12 Zn 24.00	62,0. .66,0	11,0...13,0	–	ostatak	dobra spos. obl., za opruge; za pribor za jelo
Cu Ni 15 Zn 21.00	63,0...67,0	13.5...16,5	–	ostatak	dobro se preša, kuje i obrađuje
Cu Ni 18 Zn 20.00	60,0...64,0	17,0...19,0	–	ostatak	dobra sposobnost obl., za ukrasne predmete
Cu Ni 18 Zn 27.00	59,0...63,0	17,0...19,0	–	ostatak	općenito
Cu Ni 18 Zu 19 Pb 1.00	59,0...63,0	17,0...19,0	0,3...1,5	ostatak	za finu mehaniku i optiku; ključeve

Poznati trgovački nazivi za novo srebro: alpaka, argentan, pakfong. »Kitajsko srebro« je starije ime za posrebreno novo srebro.

*

Slitina bakra sa silicijem (»silicijska bronca«) – (2,8 . . . 3,5% Si; 1 . . . 1,5% Mn; ost. Cu) – služi za opruge koje su električni vodiči, kovinska sita itd.

Slitina bakra s berilijem (»berilijska bronca«) – (1,5 . . . 2,5% Be) – lako se kali (otvrdnjava), čime se postiže tvrdoća do 400 HB.

Bakrove slitine za lijevanje
(JUS C.D2.300 – 1980/1986)

Slitine bakra sa cinkom i olovom (»Mjedi za lijevanje«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Pb	Al	Zn
• **Cu Zu 33 Pb 2**.00	63,0...67,0	1,0...3,0	–	ostatak
• **Cu Zu 39 Pb** .00	60,0...63,0	0,5...2,0	0,0...0,5	ostatak
• **Cu Zn 40 Pb** .00	58,0...63,0	0,5...2,5	0,2...0,8	ostatak

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p\ 0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Zn 33 Pb 2.01	70	180	12	450	otpornost prema koroziji, armature
K. Cu Zn 39 Pb .02	80	250	25	750	armature za plin i vodu
T. Cu Zn 39 Pb .05	120	250	15	750	armature za plin i vodu
P. Cu Zn 40 Pb .01	–	220	15	–	armature, okovi, precizna mehanika
K. Cu Zn 40 Pb .02 T. Cu Zn 40 Pb .05	120	280	15	750	armature, okovi, precizna mehanika

Slitine bakra sa cinkom te aluminijem, željezom i manganom (»Posebne mjedi za lijevanje«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %				
	Cu	Al	Fe	Mn	Zn
• **Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3**.00	60,0...66,0	4,5...7,0	2,0...4,0	1,5...4,0	ostatak
• **Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3**.00	60,0...66,0	2,5...5,0	1,5...4,0	1,5...4,0	ostatak
• **Cu Zn 35 Al Fe Mn** .00	57,0...65,0	0,5...2,5	0,5...2,0	0,1...3,0	ostatak

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p\ 0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.01	400	725	10	1800	statički jako opterećeni dijelovi konstrukcija
C. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.03 N. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.04	400	740	10	1900	statički jako opterećeni dijelovi konstrukcija
P. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.01	300	600	18	1400	velika statička čvrstoća i tvrdoća
C. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.03 N. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.04	300	600	18	1500	velika statička čvrstoća i tvrdoća
P. Cu Zn 35 Al Fe Mn .01	170	450	20	1100	umjerena klizna mehanička svojstva, brodski propeleri
K. Cu Zn 35 Al Fe Mn .02 C. Cu Zn 35 Al Fe Mn .03 N. Cu Zn 35 Al Fe Mn .04 T. Cu Zn 35 Al Fe Mn .05	200	475	18	1100	umjerena klizna mehanička svojstva, brodski propeleri

Slitine bakra s kositrom (»Kositrena bronca za lijevanje«)

Oznake i sastav

Oznaka	Sastav %				
	Cu	Sn	Ni	Pb	P
• **Cu Sn 14**.00	85,0 ... 87,0	12,9 ... 15,0	–	–	< 0,2
• **Cu Sn 12**.00	85,0 ... 88,5	10,8 ... 12,8	–	–	0,05 ... 0,40
• **Cu Sn 12 Ni 2**.00	84,0 ... 87,5	11,0 ... 13,0	1,5 ... 2,5	–	0,05 ... 0,40
• **Cu Sn 12 Pb 2**.00	84,0 ... 87,5	11,0 ... 13,0	–	1,2 ... 2,5	0,05 ... 0,40
• **Cu Sn 11 P**.00	86,0 ... 89,5	10,0 ... 12,0	–	–	0,15 ... 1,5
• **Cu Sn 10**.00	88,0 ... 91,0	9,0 ... 10,7	–	–	–
• **Cu Sn 10 P**.00	87,0 ... 89,5	10,0 ... 11,5	–	–	0,5 ... 1,0

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postot prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Sn 14.01 C. Cu Sn 14.03 N. Cu Sn 14.04	140 150 150	200 220 220	3 1,5 2	850 950 950	velika otpornost na koroziju i mor. vodu
P. Cu Sn 12.01 K. Cu Sn 12.02 C. Cu Sn 12.03 N. Cu Sn 12.04	130 150 150 150	240 270 270 270	6 4 4 4	800 – 950 900	velika otpornost prema habanju, koroziji i morskoj vodi
P. Cu Sn 12 Ni 2.01 C. Cu Sn 12 Ni 2.03 N. Cu Sn 12 Ni 2.04	160 180 180	280 300 300	12 8 10	900 1000 1000	dobra otpornost prema habanju, koroziji i morskoj vodi
P. Cu Sn 12 Pb 2.01 C. Cu Sn 12 Pb 2.03 N. Cu Sn 12 Pb 2.04	130 150 150	240 280 280	4 5 7	800 900 900	dobra otpornost prema habanju, koroziji i morskoj vodi
P. Cu Sn 10.01 C. Cu Sn 10.03 N. Cu Sn 10.04	130 150 150	240 270 270	5 7 7	700 950 900	velika žilavost, otpornost na koroziju i morsku vodu

Slitine (P., K., C., N.). Cu Sn 11 P.00 i Cu Sn 10 P.00 (01, 02, 03, 04) su otporne prema habanju, koroziji i morskoj vodi.

Slitine bakra s olovom i kositrom
(»Olovno-kositrena bronca za lijevanje«)

Sastav

Oznaka	Sastav %		
	Cu	Pb	Sn
• **Cu Pb 9 Sn 5**.00	80,0 ... 87,0	8,0 ... 10,0	4,0 ... 6,0
• **Cu Pb 10 Sn 10**.00	78,0 ... 82,0	8,0 ... 11,0	9,0 ... 11,0
• **Cu Pb 15 Sn 8**.00	75,0 ... 79,0	13,0 ... 17,0	7,0 ... 9,0
• **Cu Pb 20 Sn 5**.00	70,0 ... 78,0	18,0 ... 23,0	4,0 ... 6,0

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Pb 9 Sn 5.01 K. Cu Pb 9 Sn 5.02 C. Cu Pb 9 Sn 5.03 N. Cu Pb 9 Sn 5.04	80 80 80 130	160 200 220 230	7 5 6 9	– – – –	otpornost na koroziju (za pare sumpor. i solne kiseline), klizni ležaji
P. Cu Pb 10 Sn 10.01 C. Cu Pb 10 Sn 10.03 N. Cu Pb 10 Sn 10.04	80 140 110	180 220 220	7 3 6	650 700 700	dobra otpornost prema habanju i koroziji, klizni ležaji
P. Cu Pb 15 Sn 8.01 C. Cu Pb 15 Sn 8.03 N. Cu Pb 15 Sn 8.04	80 100 100	170 220 220	5 8 8	600 650 650	dobra klizna svojstva, otpornost na sumpor. i solnu kiselinu
P. Cu Pb 20 Sn 5.01 N. Cu Pb 20 Sn 5.04	60 80	150 180	5 7	500 –	dobra klizna svojstva, otpor. na koroziju

Slitine bakra s kositrom, cinkom i olovom (»Crveni lijev«)

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Sn	Zn	Pb
• **Cu Sn 10 Zn 2**.00	86,0 ... 89,0	9,1 ... 11,0	1,0 ... 3,0	–
• **Cu Sn 8 Pb 2**.00	82,0 ... 91,0	6,0 ... 9,0	–	0,5 ... 4,0
• **Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3**.00	81,0 ... 85,0	6,0 ... 8,0	2,0 ... 5,0	5,0 ... 8,0
• **Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5**.00	84,0 ... 86,0	4,0 ... 6,0	4,0 ... 6,0	4,0 ... 6,0
• **Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7** 00	78,0 ... 82,0	2,5 ... 3,5	7,0 ... 10,0	6,0 ... 8,0

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Sn 10 Zn 2.01 C. Cu Sn 10 Zn 2.03 N. Cu Sn 10 Zn 2.04	120 149 140	240 270 270	12 7 7	750 850 800	umjereno opterećeni klizni dijelovi, otpor. na morsku vodu
P. Cu Sn 8 Pb 2.01 K. Cu Sn 8 Pb 2.02 C. Cu Sn 8 Pb 2.03 N. Cu Sn 8 Pb 2.04	130 130 130 130	250 220 230 270	16 2 4 5	– – – –	otpornost na morsku vodu i koroziju, za armature i kućišta pumpi
P. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.01[1)] C. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.03[2)]	100 120	210 260	12 12	650 750	otpornost na koroziju i morsku vodu
P. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.01[3)] C. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.03[4)]	90 100	200 250	13 13	600 –	otpornost na koroziju i morsku vodu
P. Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.01 C. Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.03	90 100	200 201	18 16	500 550	

1) Također K. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.02. – 2) Također N. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.04 – 3) Također K. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.02. – 4) Također N. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.04.

Slitine bakra s aluminijem (»Aluminijska bronca za lijevanje«)

Sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Al	Fe	Ni
Cu Al 9.00	88,0 ... 92,0	8,0 ... 10,5	–	–
Cu Al 10 Fe 3.00	83,0 ... 89,0	8,5 ... 11,0	2,0 ... 5,0	–
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.00	76	8,5 ... 11,0	3,5 ... 5,5	3,5 ... 6,5

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Al 9.01	120	320	15	800	otpor. na koroziju,
K. Cu Al 9.02	140	450	15	850	za prehr. industriju
P. Cu Al 10 Fe 3.01	180	500	13	1150	općenito za mehanički opterećene dijelove (pri temper. −200 do +200°C)
K. Cu Al 10 Fe 3.02 C. Cu Al 10 Fe 3.03 N. Cu Al 10 Fe 3.04	200	550	15	1150	
P. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.01	250	600	10	1400	otpornost na koroziju i velika čvrstoća, za brodske propelere
K. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.02	300	600	12	1500	
C. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.03 N. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.04	280	680	12	1600	

NIKAL I NIKLENE SLITINE

Čisti nikal

Tehnički čisti nikal sadrži:

- iznad 99,6% Ni – za kemijske aparate (osobito za platiranje),
- iznad 98,7% Ni – za anode,
- iznad 98,0% Ni – za opću upotrebu (i za slitine).

Mehanička svojstva

Slitina	Stanje	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB
98,0% Ni	meko	400 ... 450	30 ... 45	80 ... 90
	tvrdo	750	1	180 ... 200

Niklene slitine za lijevanje
(DIN 17730 – 1971)

Sastav

Oznaka po DIN	Sastav %					
	Ni	Cu	Fe	Mn	Si	ostalo
G-Ni95	> 95	–	–	–	–	– [1]
G-Ni93C	> 93	–	–	–	–	1,0 ... 2,5 C [2]
G-Ni90Si	> 90	–	–	–	5,5 ... 6,5	1,0 C [3]
G-NiCu30Nb	62 ... 68	26 ... 33	1,0 ... 2,5	0,5 ... 1,5	0,5 ... 1,5	1,0 ... 1,5 Nb [4]
G-NiCu30Si3	61 ... 68	27 ... 33	1,0 ... 2,5	–	2,7 ... 3,7	0,5 ... 1,5 Al [4]
G-NiCu30Si4	60 ... 68	27 ... 31	1,0 ... 2,5	0,5 ... 1,5	3,5 ... 4,5	– [4]

Nečistoće:
[1] 2,0 Si, 1,0 C, 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 0,19 ostalo
[2] 2,0 Si, 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 1,19 ostalo
[3] 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 0,19 ostalo
[4] 1,0 razno

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka slitine	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm² min.	Postot. prod. A_5 % min.	Tvrdoća HB min.	Upotreba
G-Ni95	120	320	12	80	dobra otpornost prema koroziji, za armature, aparate i sl.
G-Ni93C	160	340	10	85	
G-Ni90Si	350	500	3	180	
G-NiCu30Nb	220	450	25	120	dobra otpornost prema eroziji (i kavitacijskoj), koroziji; velika postojanost u mor. vodi
G-NiCu30Si3	350	650	10	220	
G-NiCu30Si4	500	750	1	260	

*

Monel je slitina s približno 66% Ni, 29% Cu, 3% Mn (+ Si, Fe, C), a veoma je otporna prema koroziji. Upotrebljava se za kondenzatorske cijevi, lopatice vodnih turbina, dijelove kućanskih aparata i sl.

Niklene slitine za gnječenje

(DIN 17741, 17742, 17743, 17744 – 1983 i 17745 – 1973)

Sastav i upotreba

Oznaka po DIN	Sastav* %								Upotreba
	Ni min	Mn	Cr	Cu	Mo	Fe	Al	ostalo	
Ni99,4Fe	99,4					0,4			otporni termometri
NiMn1	98	0,6							kem. aparati
NiMn2	97	2,0							motorske svjećice
NiMn3Al	94	3,0					1,5	1 Si	termoelementi, mrežice za elektronke
NiMn5	94	5,0							
NiCr8020	76		20					1 Si	otpornici žice za grijala
NiCr7030	60	1,0	30	0,5		5		2 Si	
NiCr6015	59		15			21			
NiCr20AlSi	73	0,7	20			1	3,2	2 Si	otpornici
NiCr15Fe	72		15			8			vatrostalni dijelovi
NiCr23Fe	58	1,0	23	0,5		18	1,4	0,5 Ti	
NiCr20Ti	72	1,0	20	0,5		5		1 Si; 0,4 Ti	
NiCr20TiAl	65	1,0	20			1,5	1,4	1 Si; 2,3 Ti	trajno opter. dijelovi
NiCu30Fe	63			31		1,5			otpor. na koroziju
NiCu30Al	63			30		1	3,0	0,6 Ti	kaljivo – kem. apar.
NiMo16Cr16Ti	ost.	1,0	16	0,5	16	3		2 Co	dijelovi otporni na koroziju
NiMo28	ost.	1,0	1	0,5	28	2		1 Co	
NiCr22Mo6Cu	ost.	1,5	22	2	6	20		1 Si: 2 Co	
NiCr22Mo7Cu	ost.	1,0	22	2	7	20		5 Co	
NiMo16Cr15W	ost.	1,0	15	0,5	16	5		2 Co; 4 W	
NiCr22Mo9Nb	ost.	0,5	22	0,5	9	3		1 Co; 4 Nb	
NiCr21Mo6Cu	39	1,0	21	2,5	6	ost.		1 Co	
NiCr21Mo	38	1,0	21	2,0	3	ost.		1 Co; 0,9 Ti	
NiFe15Mo	79				4	15			meke magnetske slitine
NiFe16CuCr	76		2	5		16			
NiFe16CuMo	76			5	4	16			
NiFe48Cr	51		1			47			
NiFe47Cr	47	1,0	6			47			utaljivanje u mekom staklu
Ni49	48		1			49			
Ni48	46					51			
Ni42	41	1,0				57			
NiFe47	50	0,6				47			
NiFe46	51	0,6				46			
NiFe45	53					45			
NiFe44	53	0,5				44			
NiCo2918	28					54		18 Co	
NiCo2823	27	0,5				48		23 Co	

* Prosječne i zaokružene vrijednosti.

CINK I CINČANE SLITINE

Čisti cink

Tehnički čisti cink – u pločama (JUS C.E1.020 – 1970)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %		Upotreba
	Zn min.	nečistoće maks.	
Zn 99,995	99,995	0,005	za cinčane slitine za tlačno lijevanje, za bakrene slitine s cinkom (i niklom); za duboko izvlačenje
Zn 99,99	99,99	0,01	
Zn 99,95	99,95	0,05	za galvansko cinčanje, za slitine
Zn 99,5	99,5	0,5	za galvansko i toplo cinčanje, slitine s cinkom, cinčano bjelilo itd.
Zn 98,5	98,5	1,5	
Zn 97,5	97,5	2,5	

Cinčane slitine za lijevanje

(JUS C.J6.040 – 1963 i DIN 1743/2 – 1967

Oznaka i sastav

Oznaka JUS – DIN	Sastav %				Nečistoće % maks.
	Al	Cu	Mg	Zn	
- po JUS:					
T. Zn Al 4	3,5 . . . 4,3	0,0 . . . 0,5	0,02 . . . 0,06	ostatak	0,08 Fe 0,005 Cd 0,007 Pb 0,003 Sn
T. Zn Al 4 Cn 1	3,5 . . . 4,3	0,5 . . . 1,2	0,02 . . . 0,06	ostatak	
- po DIN					
GK – Zn Al 4 Cu 3	3,5 . . . 4,3	2,5 . . . 3,2	0,03 . . . 0,06	ostatak	0,075 Fe 0,009 Pb + Cd 0,002 Sn
GK – Zn Al 6 Cu 1	5,6 . . . 6,0	1,2 . . . 1,6	(< 0,005)*	ostatak	

* kao nečistoća.

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm² min.	Vlačna čvrst. R_m N/mm² min.	Postot. prod. A_5 % min.	Tvrdoća HB min.	Upotreba
T. Zn Al 4	200	250	1,5	70	tlačni odljevci točnih dimenzija
T. Zn Al 4 Cu 1	220	270	2	80	tlačni odljevci tankih stijenki
G-Zn Al 4 Cu 3	170	220	0,5	90	odljevci u pijesku
GK-Zn Al 4 Cu 3	200	240	1	100	odljevci u kokili
G-Zn Al 6 Cu 1	150	180	1	80	ljevački odljevci u pijesku odnosno kokili
GK-Zn Al 6 Cu 1	170	220	1,5	80	

OLOVO I OLOVNE SLITINE

Čisto olovo

Rafinirano olovo – u bloku (JUS C.E1.030 – 1978)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %			Upotreba
	Pb min.	Cu	nečistoće maks.	
Pb 99,99	99,99	–	0,01	za optičko staklo, akumulatore
Pb 99,985	99,985	–	0,015	za kemijske aparate
Pb 99,95	99,95	–	0,05	za slitine, kabelske plašteve
Pb 99,9	99,90	–	0,10	za slitine, kabelske plašteve
Pb H. 99,9	99,90	0,04 . . . 0,10	0,06	za kemijske aparate pri povišenim temperaturama

Slitine olova s kositrom i antimonom

Tiskarske slitine (JUS C.E1.101 – 1966)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %			Tiskarska oznaka slitine	Upotreba
	Pb	Sn	Sb		
G Pb Sn 3 Sb 4	93	3	4	3/4	podloge galvanskih ploča
G Pb Sn 4 Sb 15	81	4	15	4/15	za stereo-ploče
G Pb Sn 5 Sb 12	83	5	12	5/12	za strojeve linotype
G Pb Sn 5 Sb 14	81	5	14	5/14	za stereo-ploče
G Pb Sn 9 Sb 17	74	9	17	9/17	za strojeve monotype
D Pb Sn 30 Sb 6*	64	30	6	30/6	za povećanje žitkosti
D Pb Sn 5 Sb 28*	67	5	28	5/28	za povećanje tvrdoće

* Dodatne slitine.

Slitine za plašteve električnih kablove (JUS C.E1.040 – 1963)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %				Upotreba
	Cu	Sn	Sb	Pb	
E Pb 99,9	–	–	–	> 99,90	vrlo meko, za posebne svrhe
E Pb Cu	0,04	–	–	ostatak	vrlo meko, za opću upotrebu
E Pb Sb	–	–	0,85	ostatak	tvrdo, za telefonske kabele
E Pb Sn Sb	–	0,40	0,20	ostatak	meko, za brodske kabele

Slitine olova s antimonom (JUS C.E1.035 – 1963)

Sastav %		Upotreba
1 . . . 5 Sb	ost. Pb	limovi, trake, cijevi, žice
6 Sb	ost. Pb	armature
7 . . . 10 Sb	ost. Pb	ploče za zaštitu od radioaktivnog zračenja
5,5 Sb	ost. Pb	za akumulatore
8,8 Sb	ost. Pb	za akumulatore

Kositrene i olovne slitine za ležaje (JUS C.E1.100 – 1963)

(»Bijela kovina«)

Oznaka	Sastav %	Tvrdoća HB pri °C 20	50	100	Talište °C	Temperatura lijevanja °C
L. Sn 89	88 . . . 90 Sn 3 . . . 4 Cu 7 . . . 8 Sb	24,5	19	12	241 . . 354	424 . . . 450
L. Sn 80	79 . . . 81 Sn 8 . . . 10 Cu 11 . . . 12 Sb	27	20	10	230 . . . 400	440 . . . 460
L. Sn 80 Pb	79 . . . 81 Sn 5 . . . 7 Cu 11 . . . 13 Sb 1 . . . 3 Pb	27	20	10	182 . . . 400	440 . . . 460
L. Pb Sn 9 Cd	8 . . . 10 Sn 0,5 . . . 1,5 Cu 13 . . . 15 Sb 0,75 . . . 1,0 Cd 0,75 . . . 1,0 As 0,4 . . . 0,6 Ni ost. Pb	28	23	15	240 . . . 400	450 . . . 520
L. Pb Sn 6 Cd	5 . . . 7 Sn 0,5 . . . 1,5 Cu 14 . . . 16 Sb 0,75 . . . 1,0 Cd 0,75 . . 1,0 As 0,4 . 0,6 Ni ost. Pb	26	21	15	245 . . . 420	480 . . . 520
L. Pb Sn 10	9,5 . . . 10,5 Sn 0,5 . . . 1,5 Cu 14,5 . . . 16,5 Sb ost. Pb	23	16	9	235 . . . 370	420 . . . 450
L. Pb Sn 5	4,5 . . . 5,5 Sn 0,5 . . . 1,5 Cu 14,5 . . . 16,5 Sb ost. Pb	22	13	6	240 . . . 420	450 . . . 520

Upotreba

L. Sn 89, L. Sn 80 – za dinamički teško opterećene ležaje uz povišenu temperaturu

L. Sn 80 Pb – za dinamički teško opterećene ležaje

L. Pb Sn 9 Cd, L. Pb Sn 6 Cd – za ležaje dobre klizne sposobnosti pri velikim opterećenjima

L. Pb Sn 10, L. Pb Sn 5 – za ležaje dobre klizne sposobnosti pri umjerenim opterećenjima

LEMOVI

Tvrdi lemovi

Mjedeni lemovi (JUS C.D2.306 – 1957)

Oznaka	Sastav %			Temper. lemljenja °C	Upotreba
	Cu	Zn min.	Si		
S. Cn 85 Zn	84...86	13	0,2...0,4	1020	za bakar, bakrene slitine, čelik i lijevano željezo
S. Cu 63 Zn	62...64	35	0,2...0,4	910	
S. Cn 60 Zn	59...61	38	0,2...0,4	900	
S. Cu 54 Zn	53...55	44	0,2...0,4	890	za bakrene i niklene slitine i lijevano željezo
S. Cu 48 Zn	47...49	50	–	870	
S. Cu 42 Zn	41...43	56	–	845	za bakrene i niklene slitine

Bakreni lemovi (DIN 8513/1 – 1979)

Oznaka po DIN	Sastav %			Temper. lemljenja °C	Upotreba
	Cu	Sn	P		
L-Cu	> 99,90	–	–	1083	za nelegirani čelik
L-SF Cu	> 99,90	–	0,02...0,05	1083	
L-Cn Sn6	> 91	5...8	0...0,4	1040	za željezne i niklene slitine
L-Cu Sn 12	> 86	11...13	0...0,4	990	

Meki lemovi (JUS C.E1.041 – 1963)

Oznaka	Sastav* %		Najniža temperatura lemljenja °C	Upotreba
	Sn	Pb		
S. Sn 20	20	80	275	za prevlake kovina
S. Sn 25	25	75	257	za strojno lemljenje plamenom
S. Sn 30	30	70	249	
S. Su 33	33	67	242	za lemljenje razmazivanjem
S. Sn 35	35	65	237	
S. Sn 40	40	60	223	za lemljenje olova
S. Sn 50	50	50	200	za opće svrhe
S. Sn 60	60	40	185	za fino lemljenje
S. Sn 75	75	25	185	za lemljenje zdravstvenih predmeta

* Dopustive nečistoće (maks.) %: 0,25 Bi; 0,02 Fe; 0,05 As; 0,005 Al; 0,005 Zn.

*

Slitine s ekstremno niskim talištem:

Roseova slitina: 50% Bi, 25% Pb, 25% Sn – talište 94 °C.
Woodova slitina: 50% Bi, 25% Pb, 12,5% Sn, 12,5% Cd – talište 70 °C.

Srebrni lemovi (JUS C.D2.307 – 1957)

Oznaka	Sastav %					Talište °C
	Ag	Cu maks.	Cd	razno maks.	Zn	
S. Cu 55 Zn Ag 8	7...9	55	–	–	ostatak	870
S. Cu 52 Zn Ag 12	11...13	52	–	–		830
S. Cu 52 Zn Ag 12 Cd	11...13	52	5...9	–		800
S. Cu 49 Zn Ag 15 Cd	14...16	49	8...12	–		770
S. Cu 43 Zn Ag 20 Cd	19...21	43	13...17	–		750
S. Cn 43 Zn Ag 25	24...26	43	–	–		780
S. Cu 42 Zu Ag 25 Cd	24...26	42	12...16	–		730
S. Cu 40 Zn Ag 27 Mu	26...28	40	–	10 Mn, 6 Ni		840
S. Cu 44 Zn Ag 30 Cd	29...31	44	3...7	–		770
S. Cu 36 Zn Ag 30 Cd	29...31	36	10...14	–		700
S. Cu 42 Zn Ag 38 Sn	37...39	42	–	4 Sn		800
S. Cu 32 Zn Ag 44	43...45	32	–	–		730
S. Cu 19 Zn Ag 45 Cd	44...46	19	18...22	–		620
S. Cu 18 Zn Ag 49 Mn	48...50	18	–	8 Mn, 5 Ni		690
S. Cu 32 Zn Ag 50 Cd	49...51	32	3...7	–		700

Upotreba

Srebrni su lemovi namijenjeni općenito za lemljenje čelika, lijevenog željeza, bakra i bakrenih slitina, a osobito:

S. Cu 52 Zn Ag 12 Cd, S. Cu 49 Zn Ag 15 Cd, S. Cu 43 Zn Ag 20 Cd – za lemljenje čelika (i platiranih čeličnih limova) s bakrom;

S. Cu 40 Zn Ag 27 Mn za kemijski otporne čelike i tvrde metale;

S. Cu 42 Zn Ag 38 Sn – kao lem otporan prema morskoj vodi;

S. Cu 32 Za Ag 44 – kao vatrostalni lem;

S. Cu 32 Zn Ag 50 Cd – kao lem otporan prema koroziji.

Aluminijski lemovi

Tvrdi lemovi za aluminij (DIN 8513/4 – 1981)

Oznaka po DIN	Sastav %		Temperatura lemljenja °C	Upotreba
	Si	Al		
L-Al Si 7,5	6,8... 8,2	ostatak	605...615	općenito za aluminij (naročito za slitine Al Mn)
L-Al Si 10	9,0...10,5		595...605	
L-Al Si 12	11,0...13,5		590...600	

Meki lemovi za aluminij (DIN 1707 – 1981)

Oznaka po DIN	Sastav %				Temper. lemljenja °C	Upotreba
	Sn	Zn	Cd	drugo		
L-Su Zn 10	85...92	8...15	–	–	200...250	tarni lemovi
L-Sn Zn 40	55...70	30...45	–	–	200...340	
L-Cd Zn 20	–	17...25	75...83	–	265...280	manje osetljiv prema koroziji
L-Zn Al 5	–	94,0...96,0	–	4,0.. 6,0Al	380...390	lemlj. ultrazvukom i u peći

POSEBNE SLITINE ZA ELEKTROTEHNIKU

Slitine za električne otpornike (DIN 17471 – 1983)

Oznaka po DIN	Sastav %				Specifični električni otpor Ω mm²/m				Upotreba
	Mn	Ni	Al	Cu	20 °C	100 °C	300 °C	500 °C	
Cu Mn 12 Ni*	12	2	–	ost.	0,43	0,43	–	–	za preciz. mjerne otpornike
Cu Ni 20 Mn 10	10	20	–		0,49	0,49	0,49	–	
Cu Ni 44**	1	44	–		0,49	0,49	0,49	0,49	
Cu Mn 2 Al	2	–	0,8		0,125	0,130	–	–	za opće otpornike
Cu Ni 30 Mn	3	30	–		0,40	0,405	0,417	0,432	
Cn Mn 12 Ni Al	12	5	1,2		0,50	0,50	0,50	0,50	

* »Manganin«. – ** »Konstantan«.

Nikelin je slitina sa (%): 55 ... 68 Cu, 31 ... 32 Ni, 0 ... 13 Zn, a ima specifični električni otpor 0,40 ... 0,44 Ω mm²/m.

Slitine za elekrične žice za visoke temperature (DIN 17470 – 1984)

Oznaka po DIN	Sastav %				Specifični električni otpor Ω mm²/m				Upotreba do °C
	Cr	Ni	Al	Fe	20 °C	400 °C	800 °C	1200 °C	
Ni Cr 80 20[1]	20	ost.	–	–	1,12	1,15	1,14	1,17	1200
Ni Cr 60 15[2]	15	ost.	–	22	1,13	1,20	1,22	1,28	1150
Ni Cr 30 20[3]	20	30	–	ost.	1,04	1,17	1,26	–	1100
Cr Ni 25 20[4]	25	20	–	ost.	0,95	1,11	1,22	–	1050
Cr Al 25 5	25	–	5	ost.	1,44	1,45	1,48	1,49	1300
Cr Al 20 5	20	–	5	ost.	1,37	1,39	1,44	1,45	1200

[1] »Cekas II«. – [2] »Cekas«. – [3] »Cekas 0«. – [4] »Cekas I«.

Kantal je slitina sa (%): 30 Cr, 5 Al, 3 Co i ost. Fe, a upotrebljava se do 1350 °C.

Slitine posebne električne permeabilnosti

Naziv	Sastav u %					
	Ni	Cu	Mo	Mn	C	Fe
slitina »1040«	72	14	3	–	< 0,1	11
permalloy A	78,5	–	–	–	–	21,5
permalloy B	48	–	–	–	< 0,1	52
permalloy C	78,5	–	3	0,5	< 0,1	18

Slitine za permanentne magnete

Naziv	Sastav u %						
	Co	Cr	Mo	Ni	Al	razno	Fe
permendur	49	–	–	–	–	2 V	49
koerzit 15 Co 70	16	9	1,6	–	–	–	ost.
koerzit 30 Co 90	31	4,7	0,4	–	–	4,8 Ti	
500 koerzit 120	–	–	–	27,5	13	–	
700 koerzit 160	10	–	–	24,5	11,5	4 Cu	
slitine Mishima: 1)	–	–	–	26	14	+ Cu	
2)	7,5	–	–	27	6	+ Cu	

TITAN I TITANOVE SLITINE

Čisti titan

Titan kristalizira u dva kristalna oblika: pod temperaturom pretvorbe 882 °C je Ti_α koji kristalizira heksagonalno, nad tom temperaturom nastaje Ti_β koji kristalizira u kubnoj prostorno centraliziranoj rešetki.

Gustoća titana leži među gustoćama teških i lakih kovina:

Ti_α (20 °C) $\varrho = 4505$ kg/m³ Ti_β (900 °C) $\varrho = 4320$ kg/m³

Tehnički čisti titan (DIN 17850 – 1985)

Oznaka	Sastav (%)					
	Fe maks.	O ≈	N maks.	C maks.	H maks.	Ti
3.7025	0,20	0,10	0,05	0,08	0,13	ost.
3.7035	0,25	0,20	0,06	0,08	0,13	
3.7055	0,30	0,25	0,06	0,10	0,13	
3.7065	0,35	0,30	0,07	0,10	0,13	

Mehanička svojstva kovanog titana (DIN 17864 – 1973)

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Naprez. tečenja R_{p1} N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. produlj. A_5 % uzd.	Postot. produlj. A_5 % popr.	Tvrdoća HB	Žilav. *KU/3* J uzd.	Žilav. *KU/3* J popr.
3.7025.10	> 180	> 200	250 ... 410	30	25	120	85	60
3.7035.10	> 250	> 270	390 ... 540	22	20	150	40	35
3.7055.10	> 320	> 350	460 ... 590	28	16	170	35	25
3.7065.10	> 390	> 410	540 ... 740	16	15	200	25	20

Tehnički čisti titan je otporan prema koroziji, postojan u morskoj vodi i morskoj klimi. Upotreba: za kemijske aparate i u zrakoplovstvu.

Titanove slitine (DIN 17851 – 1973)

Oznaka	Sastav (%)*				Gustoća kg/m³
	Al	V	Sn	Ti	
TiAl 6 V 4	5,5 ... 6,75	3,5 ... 4,5	–	ost.	4450
TiAl 5 Sn 2	4,0 ... 6,0	–	2,0 ... 3,0		4500

* Dozvoljene nečistoće (%): 0,08 C, 0,30 ... 0,50 Fe, 0,015 ... 0,020 H, 0,05 N, 0,20 O.

Mehanička svojstva titanovih slitina (DIN 17864)

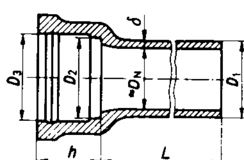
Oznaka	Modul elast. *E* N/mm²	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Postot. produlj. %	Žilavost *KU/3* J	Upotreba
TiAl 6 V 4-F89	111000	820	890	10	31	do 480 °C
TiAl 5 Sn 2-F79	–	760	790	8	–	do 500 °C

Titanove slitine dobro se zavaruju, otporne su prema koroziji. Njihova znatna čvrstoća i razmjerno mala gustoća omogućuju konstruiranje najlakših dijelova (zrakoplovstvo, svemirska tehnika).

ODLJEVCI OD SIVOG LIJEVA

za tlačne cjevovode

Cijevi s kolčakom (JUS C.J1.030 — 1961)



Razred*		Nazivni tlak bar za D_N (mm) 50, 65	Nazivni tlak bar za D_N (mm) 80...1200	Ispitni tlak bar za D_N (mm) ...600	Ispitni tlak bar za D_N (mm) 600)...
LA	c	16	10	20	15
A	c	—	12,5	25	20
	g	12,5	10	20	15
B	c	—	16	30	25
	g	—	12,5	25	20

* c — centrifugalni lijev, g — gravitacijski lijev

Nazivni promjer D_N mm	Dimenzije D_1 mm	D_2 mm	D_3 mm	h mm	δ (mm) pri razredu LA	A	B	Masa kolčaka kg	cijevi* kg/m
50	66	78	84	77	6,7	7,3	—	3,3	8,9
65	82	94	100	80	6,9	7,6	—	4,4	11,6
80	98	110	116	84	7,2	7,9	8,6	5,5	14,7
100	118	131	137	88	7,5	8,3	9,0	7,1	18,6
125	144	157	163	91	7,9	8,7	9,5	9,2	24,2
150	170	183	189	94	8,3	9,2	10,0	11,5	31,1
200	222	235	241	100	9,2	10,1	11,0	16,8	44,0
250	274	287	294	103	10,0	11,0	12,0	22,9	59,3
300	326	339	346	105	10,8	11,9	13,0	29,8	76,5
350	378	391	398	107	11,7	12,8	14,0	37,5	96,3
400	429	442	449	110	12,5	13,8	15,0	46,3	116,9
450	480	494	501	112	13,3	14,7	16,0	56,0	141,0
500	532	546	553	115	14,2	15,6	17,0	66,0	165,2
600	635	650	657	120	15,8	17,4	19,0	89,3	219,8
700	738	753	760	122	17,5	19,3	21,0	116,8	283,2
800	842	857	865	125	19,2	21,1	23,0	147,8	354,9
900	945	960	968	128	20,8	22,9	25,0	182,6	431,8
1000	1048	1064	1072	130	22,5	24,8	27,0	222,3	518,3
1100	1152	1169	1177	135	24,2	26,6	29,0	265,6	613,1
1200	1256	1273	1281	140	25,8	28,4	31,0	313,2	712,9

* Masa cijevi vrijedi za razred LA. Mase cijevi za razrede A i B su približno za 10 odnosno 20% veće.

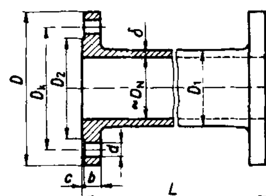
Nazivni promjeri D_N	50, 65	80...150	200...	mm
Duljine L	2 i 3	3, 4 i 5	4 i 5	m

Cijevi s prirubnicom

(JUS C.J1.033 — 1961)

Razred*		Nazivni tlak (bar)	Ispitni tlak (bar) za D_N (mm) = ...300	300)...600	600)...
B	g	12,5	25	20	15

* g — gravitacijski lijev (u pješčanim kalupima).



Nazivni promjer D_N mm	Dimenzije D_1 mm	D_2 mm	D mm	b mm	δ mm	Rupe za vijke D_k mm	n*	d mm	Masa prirubnice kg	cijevi kg/m
50	66	98	165	20,5	8,0	125	4	19	2,7	10,4
65	82	118	185	21,0	8,3	145	4	19	3,3	13,7
80	98	133	200	21,0	8,6	160	4	19	3,7	17,3
100	118	153	220	22,0	9,0	180	8	19	4,2	22,0
125	144	183	250	22,5	9,5	210	8	19	5,3	28,7
150	170	209	285	23,0	10,0	240	8	23	6,7	35,9
200	222	264	340	24,5	11,0	295	8	23	9,3	52,1
250	274	319	395	26,0	12,0	350	12	23	12,0	70,6
300	326	367	445	27,5	13,0	400	12	23	14,8	91,4
350	378	427	505	29,0	14,0	460	16	23	19,0	114,5
400	429	477	565	30,0	15,0	515	16	28	23,4	139,5
450	480	528	615	31,5	16,0	565	20	28	26,5	169,0
500	532	582	670	33,0	17,0	620	20	28	32,1	196,7
600	635	682	780	36,0	19,0	725	20	31	44,0	262,9
700	738	797	895	38,5	21,0	840	24	31	59,9	338,2
800	842	904	1015	41,5	23,0	950	24	34	80,8	423,1
900	945	1004	1115	44,0	25,0	1050	28	34	94,6	516,6
1000	1048	1111	1230	47,0	27,0	1160	28	37	120,0	619,2
1100	1152	1221	1340	50,0	29,0	1270	32	37	139,0	731,5
1200	1256	1329	1455	52,5	31,0	1380	32	40	173,0	853,0

* n — broj rupa.

Vrijednost c na slici iznosi:

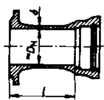
D_N =	50...250	300...500	600...1200	mm
c =	3	4	5	mm

Duljine L iznose za D_N = 50, 65 i 80 mm: 1, 2 ili 3 m, za sve ostale D_N: 1, 2, 3 ili 4 m.

Fazonski cijevni komadi (JUS C.J1. 040 ... 081 — 1961)

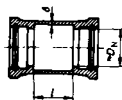
Spojni komadi

s kolčakom i prirubnicom (JUS C.J1.040)



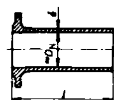
D_N = 50...1200
δ = 9,3...36,2
l = 150...500

s kolčacima (JUS C.J1.041)



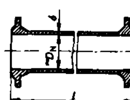
D_N = 50...1200
δ = 10,1...38,0
l = 155...270

s prirubnicom (JUS C.J1.042)



D_N = 50...1200
δ = 9,3...36,2
l = 400...800

s prirubnicama (JUS C.J1.043)

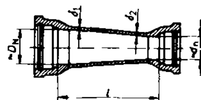


D_N = 50...1200
δ = 9,3...36,2
l = 100...900

(Sve su mjere u mm)

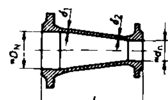
Redukcijski komadi

s kolčacima (JUS C.J1.050)



D_N = 65...1200 mm
d_n = 50...1100 mm
δ_1 = 9,7...36,2 mm
δ_2 = 9,3...33,8 mm
l = 200...600 mm

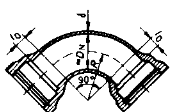
s prirubnicama (JUS C.J1.051)



D_N = 65...1200 mm
d_n = 50...1100 mm
δ_1 = 9,7...36,2 mm
δ_2 = 9,3...33,8 mm
l = 200...600 mm

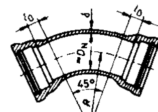
Lukovi — s kolčacima

1/4 luk (JUS C.J1.060)



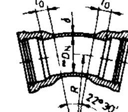
D_N = 50...500
δ = 9,3...19,8
R = 110...515
l_0 = 40...85

1/8 luk (JUS C.J1.061)



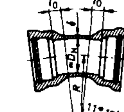
D_N = 50...1200
δ = 9,3...36,2
R = 250...1400
l_0 = 40...155

1/16 luk (JUS C.J1.062)



D_N = 50...1200
δ = 9,3...36,2
R = 250...1400
l_0 = 40...155

1/32 luk (JUS C.J1.063)

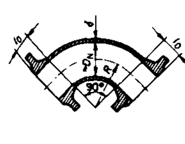


D_N = 50...1200
δ = 9,3...36,2
R = 250...1400
l_0 = 40...155

(Sve su mjere u mm)

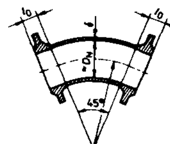
— s prirubnicama

1/4 luk (JUS C.J1.064)



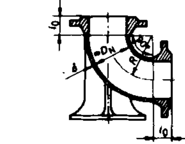
D_N = 50...1200 mm
δ = 9,3...36,2 mm
R = 110...1145 mm
l_0 = 40...155 mm

1/8 luk (JUS C.J1.065)



D_N = 50...1200 mm
δ = 9,3...36,2 mm
R = 266...1400 mm
l_0 = 40...155 mm

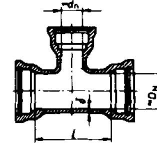
luk sa stopalom (JUS C.J1.068)



D_N = 50...600 mm
δ = 9,2...22,2 mm
R = 110...605 mm
l_0 = 40...95 mm

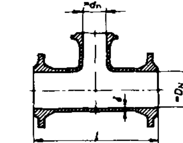
Odvojci

s kolčacima (JUS C.J1.070)



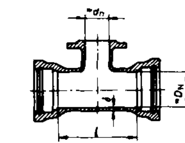
D_N = 50...600 mm
d_n = 50...600 mm
δ = 9,3...22,2 mm
l = 171...940 mm

s prirubnicama (JUS C.J1.071)



D_N = 50...1200 mm
d_n = 50...1200 mm
δ = 9,3...36,2 mm
l = 300...1700 mm

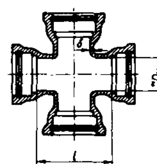
s kolčacima i prirubnicom (JUS C.J1.072)



D_N = 50...1200 mm
d_n = 50...1200 mm
δ = 9,3...36,2 mm
l = 170...1780 mm

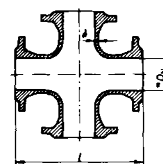
Križni komadi

s kolčacima (JUS C.J1.080)



D_N = 50...600 mm
δ = 9,3.. 22,2 mm
l = 170...940 mm

s prirubnicama (JUS C.J1.081)



D_N = 50...1200 mm
δ = 9,3...36,2 mm
l = 300...1700 mm

ČELIČNI POLUPROIZVODI

Mase materijala po jedinici duljine (kg/m) ili jedinici površine (kg/m^2) izračunane su s obzirom na gustoću čelika 7850 kg/m^3.

Čelik u šipkama – vruće valjan:

okrugli (JUS C.B3.021 – 1984)			*kvadratni* (JUS C.B3.024 – 1984)		
Nazivna debljina mm	Duljinska masa kg/m		Nazivna debljina mm	Duljinska masa kg/m	
	okrugli	kvadr.		okrugli	kvadr.
5,5	0,187		40	9,86	12,6
6	0,222		42	10,9	
6,5	0,260		44	11,9	
7	0,302		45	12,5	
7,5	0,347		50	15,4	19,6
8	0,395	0,502	52	16,7	
10	0,617	0,785	55	18,7	
12	0,888	1,13	60	22.2	28,3
14	1,21	1,54	65	26,0	
16	1,58	2,01	70	30,2	38.5
18	2.00	2,54	75	34,7	
20	2,47	3,14	80	39,5	50,2
22	2,98	3.80	90	49,9	
24	3,55		100	61,7	78,5
25	3,85	4,91	110	74,6	
27	4,49		120	88.8	113
28	4,83		140	121	
30	5,55	7,07	150	139	
31	5,92		160	158	
32	6,31	8,04	180	200	
35	7,55	9,62	200	247	
37	8,44		220	298	
38	8,90				

šesterokutni (JUS C.B3.026-1984)	
Nazivni zijev ključa mm	Duljinska masa kg/m
13	1,15
14	1,33
15	1,53
16	1,74
18	2,20
20,5	2,86
22,5	3,44
23,5	3,75
25,5	4,42
28,5	5,52
31,5	6,74
33,5	7,63
37,5	9,58
39,5	10,6
42.5	12,2
47,5	15,3
52	18,4
55	20,6
57	22,1
62	26,1
62,5	26,5
67	30,5
72	35,2
78	41,4
83	46,8
88	52,6
93	58,8
98	65,3
103	72,1

Navedeni su samo čelici debljine skupine A koji se obično upotrebljavaju. (Za čelike debljine skupine B koji se upotrebljavaju samo iznimno – vidi gore navedeni standard!)

Okrugli betonski čelik (JUS C.K6.020 – 1955)

Promjeri: **5**, 6, 7, 8, **10**, 12, **14**, 16, 18, **20**, 22, 25, **28**, 30, 32, 36, **40**.

Preporučuje se upotreba deblje tiskanih promjera.

Vučeni čelici u šipkama

Okrugli vučeni čelici

– vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11 (JUS C.B3.411 – 1984) i ISO h 9 (JUS C.B3.412 – 1984)

Promjer *d* mm	Masa kg/m	Promjer *d* mm	Masa kg/m	Promjer *d* mm	Masa kg/m	Promjer *d* mm	Masa kg/m
10	0,617	21	2,72	38	8,90	75	34.7
10,5	0,680	22	2,98	39	9,38	80	39,5
11	0,746	23	3,26	40	9,86	85	44,5
11,5	0,815	24	3,55	42	10,9	90	49,9
12	0,888	25	3,85	44	11,9	95*	55,6
12,5	0,963	26	4,17	45	12,5	100	61,7
13	1,04	27	4,49	46	13,0	110	74,6
13,5	1,12	28	4,83	48	14,2	120	88,8
14	1,21	30	5,55	50	15,4	125	96.3
14,5	1,30	31	5,92	52	16,7	130	104
15	1,39	32	6,31	55	18,7	140	121
16	1,58	33	6,71	58	20,7	150	139
17	1,78	34	7,13	60	22,2	160	158
18	2,00	35	7,55	63	24,5	180	200
19	2,23	36	7,99	65	26,0	200	247
20	2,47	37	8,44	70	30,2		

* Standardizirano samo u tolerancijskom području ISO h 11.

Kvadratni vučeni čelici (JUS C.B3.421 – 1986) vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11

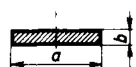
Debljina *a* mm	Masa kg/m	Debljina *a* mm	Masa kg/m	Debljina *a* mm	Masa kg/m	Debljina *a* mm	Masa kg/m
2	0,0314	10	0,785	22	3,80	50	19,6
3	0,0707	11	0,950	(24)	4,52	(55)	23.7
3,5	0,0962	12	1,13	25	4,91	(60)	28,3
4	0,126	13	1,33	(27)	5,72	63	31,2
4,5	0,159	14	1,54	28	6,15	(65)	33,2
5	0,196	(15)	1,77	(30)	7,07	70	38,5
5,5	0,237	16	2,01	32	8,04	(75)	44,2
6	0,283	(17)	2,27	(35)	9,62	80	50,2
7	0,385	18	2,54	36	10,2	100	78,5
8	0,502	(19)	2,83	40	12,6		
9	0,636	20	3,14	45	15,9		

Dimenzije u zagradama upotrebljavaju se jedino u iznimnim slučajevima.

*

Šesterokutni vučeni čelici – JUS C.B3.441 – 1984 (vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11).

Plosnati čelik



vruće valjan (JUS C.B3.025 – 1984)

Debljine 5 ... 14 mm

Širina *a* mm	Duljinska masa kg/m za debljinu *b* mm									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	0,393	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	0,471	0,565	–	–	–	–	–	–	–	–
14	0,550	0,659	0,769	0,879	–	–	–	–	–	–
15	0,589	0,707	0,824	0,942	–	1,18	–	–	–	–
16	0,628	0,754	0,879	1,00	1,13	1,26	1,38	–	–	–
18	0,707	0,848	–	1,13	1,27	1,41	–	–	–	–
20	**0,785**	**0,942**	1,10	**1,26**	1,41	**1,57**	–	1,88	2,04	–
22	0,864	1,04	1,21	1,38	–	1,73	1,90	2,07	2,25	2,42
25	**0,981**	**1,18**	1,37	**1,57**	–	**1,96**	–	**2,36**	2,55	2,75
26	1,02	1,22	1,43	1,63	–	2,04	–	2,45	2,65	2,86
28	1,10	1,32	1,54	1,76	–	2,20	–	2,64	2,86	3,08
30	**1,18**	**1,41**	1,65	**1,88**	2,12	**2,36**	–	**2,83**	3,06	3,30
32	1,26	1,51	–	2,01	–	2,51	–	3,01	3,27	3,52
35	**1,37**	**1,65**	1,92	**2,20**	2,47	**2,75**	–	**3,30**	3,57	3,85
38	1.49	1,79	–	2,39	–	2,98	–	3,58	3,88	4,18
40	**1,57**	**1,88**	2,20	**2,51**	2,83	**3,14**	–	**3,77**	4,08	4,40
45	**1,77**	**2,12**	2,47	**2,83**	–	**3,53**	–	**4,24**	4,59	4,95
50	**1,96**	**2,36**	2,75	**3,14**	3,53	**3,93**	–	**4,71**	5,10	5,50
55	2,16	2,59	–	3,45	–	4,32	–	5,18	5,61	6,04
60	**2,36**	**2,83**	3,30	**3,77**	4,24	**4,71**	–	**5,65**	6,12	7,14
65	2,55	3,06	–	4,08	4,59	5,10	–	6,12	6,63	–
70	**2,75**	**3,30**	3,85	**4,40**	–	**5,50**	–	**6,59**	7,14	–
75	2,94	3,53	–	4,71	–	5,89	–	7,07	7,65	–
80	**3,14**	**3,77**	4,40	**5,02**	–	**6,28**	6,91	**7,54**	8,16	–
90	**3,53**	**4,24**	4,95	**5,65**	6,36	**7,07**	7,77	**8,48**	9,18	–
100	**3,93**	**4,71**	5,50	**6,28**	–	**7,85**	8,64	**9,42**	10,2	11,0
110	–	–	–	6,91	7,77	8,64	9,50	10,4	11,2	12,1
120	–	–	–	**7,54**	8,48	**9,42**	10,4	**11,3**	12,2	–
130	–	–	–	8,16	9.18	10,2	11,2	12,2	13,3	14,3
140	–	–	–	8,79	9,89	11,0	–	13,2	–	–
150	–	–	–	**9,42**	–	**11,8**	13,0	**14,1**	15,3	16,5

Debelo otisnute mase vrijede za običajne dimenzije; ostale su izvanredne.
Duljina plosnatog čeĥka:
normalno: 3 ... 4 m, najveća: 12 m.

Vruće valjani plosnati čelik (JUS C.B3.025 – 1984)

Debljine 15 ... 50 mm

Širina *a* mm	Duljinska masa kg/m za debljinu *b* mm									
	15	16	17	18	20	25	30	35	40	50
20	2,36	–	–	–	–	–	–	–	–	–
22	2,59	–	–	–	–	–	–	–	–	–
25	2,94	3,14	–	–	–	–	–	–	–	–
26	3,06	3,27	–	3,67	–	–	–	–	–	–
28	–	3,52	–	3,96	–	–	–	–	–	–
30	**3,53**	3,77	–	4,24	**4,71**	5,89	–	–	–	–
32	3,77	4,02	–	–	5,02	6,28	–	–	–	–
35	**4,12**	4,40	–	4,95	**5,50**	6,87	–	–	–	–
38	4,47	4,77	–	–	5,97	7,46	–	–	–	–
40	**4,71**	5,02	–	5.65	**6,28**	7,85	9,42	–	–	–
45	**5,30**	5,65	–	–	**7,07**	8,83	10,6	–	–	–
50	**5,89**	6,28	–	7,07	**7,85**	**9,81**	**11,8**	–	15.7	–
55	6,48	6,91	–	7.77	8,64	10.8	13,0	–	–	–
60	**7,07**	7,54	–	8,48	**9,42**	**11,8**	**14,1**	16,5	18.8	–
65	7,65	8,16	–	9,18	10,2	12,8	15,3	–	20.4	–
70	**8,24**	8,79	–	9,89	**11,0**	**13,7**	**16,5**	19,2	22,0	27.5
75	8,83	9,42	10,0	–	11,8	14,7	17,7	20,6	23.6	–
80	**9,42**	10,0	10,6	–	**12,6**	**15,7**	**18,8**	22,0	**25,1**	31,4
90	**10,6**	11,3	12,0	12,7	**14,1**	17,7	**21,2**	–	**28,3**	35,3
100	**11,8**	12,3	13,3	14,1	**15,7**	**19,6**	**23,6**	–	**31,4**	39.3
110	13,0	13,8	14,7	15,5	17,3	21,6	25,9	–	34,5	43,2
120	**14,1**	15,1	16,0	17,0	**18,8**	**23,6**	**28,3**	–	**37,7**	**47,1**
130	15,3	16,3	–	18,4	20,4	25,5	30,6	–	40.8	51,0
140	16,5	17,6	–	–	22,0	27.5	33,0	–	44,0	55,0
150	**17,7**	18,8	–	–	**23,6**	**29,4**	**35,3**	–	**47,1**	**58,9**

Duljina plosnatog čelika: normalna 3 ... 4 m, maksimalna 12 m.

Široki plosnati čelik – lamele, vruće valjan
(JUS C.B3.030 – 1986): širina *a* 150 ... 1250 mm,
debljina *b* 40 ... 80 mm,
duljina *l* 2 ... 12 m.

Plosnati čelik s rebrom – za lisnate opruge, vruće valjan
(JUS C.B3.031 – 1966): širina *a* 60 ... 120 mm,
debljina *b* 10 ... 16 mm.

Vučeni plosnati čelik
(JUS C.B3.431 – 1986): širina *a* 5 ... 50 mm,
debljina *b* 1.5 ... 50 mm.

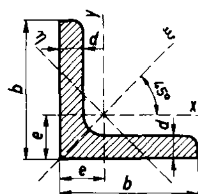
Hladno valjane čelične trake
(JUS C.B3.530 – 1967): širina *a* do 600 mm,
debljina *b* 0,08 ... 5,0 mm.

Trakasti (obručni) čelik, vruće valjan
(JUS C.B3.550 – 1960): širina *a* 10 ... 190 mm,
debljina *b* 1 ... 5 mm.

Čelični kutni profili — vruće valjani

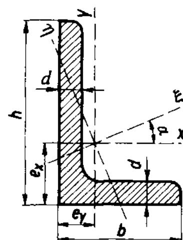
Jednakokračni kutni profili

(JUS C.B3.101 — 1962)



Raznokračni kutni profili

(JUS C.B3.111 — 1962)



Statičke veličine:

- I – moment tromosti plohe
- W – moment otpora
- i – polumjer tromosti

Konstrukcijske mjere – vidi str. 431!

Jednakokračni kutni profili

Oznaka ∟ $b \times b \times d$ mm	Presjek S mm²	Dulj. masa kg/m	Statičke veličine e mm	$I_x = I_y$ 10⁴ mm⁴ (= cm⁴)	I_η 10⁴ mm⁴ (= cm⁴)	$W_x = W_y$ 10³ mm³ (= cm³)	W_η 10³ mm³ (= cm³)	i_η mm
20×20×3	112	0,88	6,0	0,39	0,15	0,28	0,18	3,7
25×25×3	142	1,12	7,3	0,79	0,31	0,45	0,30	4,7
25×25×4	185	1,45	7,6	1,01	0,40	0,58	0,37	4,7
30×30×3	174	1,36	8,4	1,41	0,57	0,65	0,48	5,7
30×30×4	227	1,78	8,9	1,81	0,76	0,86	0,61	5,8
30×30×5	278	2,18	9,2	2,16	0,91	1,04	0,70	5,7
35×35×4	267	2,10	10,0	2,96	1,24	1,18	0,88	6,8
40×40×4	308	2,42	11,2	4,48	1,86	1,56	1,18	7,8
40×40×5	379	2,97	11,6	5,43	2,22	1,91	1,35	7,7
45×45×5	430	3,38	12,8	7,83	3,25	2,43	1,80	8,7
50×50×5	480	3,77	14,0	11,0	4,59	3,05	2,32	9,8
50×50×6	569	4,47	14,5	12,8	5,24	3,61	2,57	9,6
55×55×6	631	4,95	15,6	17,3	7,24	4,40	3,28	10,7

Jednakokračni kutni profili (nastavak)

Oznaka ∟ $b \times b \times d$ mm	Presjek S mm²	Dulj. masa kg/m	Statičke veličine e mm	$I_x = I_y$ 10⁴ mm⁴ (= cm⁴)	I_η 10⁴ mm⁴ (= cm⁴)	$W_x = W_y$ 10³ mm³ (= cm³)	W_η 10³ mm³ (= cm³)	i_η mm
60× 60× 6	691	5,42	16,9	22,8	9,43	5,29	3,95	11,7
60× 60× 8	903	7,09	17,7	29,1	12,1	6,88	4,84	11,6
65× 65× 7	870	6,83	18,5	33,4	13,8	7,18	5,27	12,6
70× 70× 7	940	7,38	19,7	42,4	17,6	8,43	6,31	13,7
70× 70× 9	1 190	9,34	20,5	52,6	22,0	10,6	7,59	13,6
75× 75× 8	1 150	9,03	21,3	58,9	24,4	11,0	8,11	14,6
75× 75×10	1 410	11,1	22,1	71,4	29,8	13,5	9,55	14,5
80× 80× 8	1 230	9,66	22,6	72,3	29,6	12,6	9,25	15,5
80× 80×10	1 510	11,9	23,4	87,5	35,9	15,5	10,9	15,4
80× 80×12	1 790	14,1	24,1	102	43,0	18,2	12,6	15,3
90× 90× 9	1 550	12,2	25,4	116	47,8	18,0	13,3	17,6
90× 90×11	1 870	14,7	26,2	138	57,1	21,6	15,4	17,5
100×100×10	1 920	15,1	28,2	177	73,3	24,7	18,4	19,5
100×100×12	2 270	17,8	29,0	207	86,2	29,2	21,0	19,5
110×110×10	2 120	16,6	30,7	239	98,6	30,1	22,7	21,6
110×110×12	2 510	19,7	31,5	280	116	35,7	26,1	21,5
120×120×11	2 540	19,9	33,6	341	140	39,5	29,5	23,5
120×120×13	2 970	23,3	34,4	394	162	46,0	33,3	23,4
130×130×12	3 000	23,6	36,4	472	194	50,4	37,7	25,4
130×130×14	3 470	27,2	37,2	540	223	58,2	42,4	25,3
140×140×14	3 720	29,2	40,2	692	282	69,3	49,7	27,5
140×140×16	4 220	33,2	40,9	775	318	78,2	55,0	27,4
150×150×14	4 030	31,6	42,1	845	347	78,2	58,3	29,4
150×150×16	4 570	35,9	42,9	949	391	88,7	64,4	29,3
160×160×15	4 610	36,2	44,9	1 100	453	95,6	71,3	31,4
160×160×17	5 180	40,7	45,7	1 230	506	108	78,3	31,3
200×200×16	6 180	48,5	55,2	2 340	943	162	121	39,1
200×200×18	6 910	54,3	56,0	2 600	1 050	181	133	39,0

Normalne duljine jednakokračnih kutnih profila: 3 ... 15 m.

Oznaka └ $b \times h \times d$ mm	Presjek S mm²	Dulj. masa kg/m	e_x (mm)	e_y (mm)	I_x 10^4 mm⁴ (= cm⁴)	I_y 10^4 mm⁴ (= cm⁴)	W_x 10^3 mm³ (= cm³)	W_y 10^3 mm³ (= cm³)
20× 30× 3	142	1,11	9,9	5,0	1,25	0,44	0,62	0,29
20× 30× 4	185	1,45	10,3	5,4	1,59	0,55	0,81	0,38
20× 40× 3	172	1,35	14,3	4,4	2,79	0,47	1,08	0,30
30× 45× 4	287	2,25	14,8	7,4	5,78	2,05	1,91	0,91
40× 60× 5	479	3,76	19,6	9,7	17,2	6,11	4,25	2,02
40× 60× 6	568	4,46	20,0	10,1	20,1	7,12	5,03	2,38
40× 60× 7	655	5,14	20,4	10,5	23,0	8,07	5,79	2,74
40× 80× 6	689	5,41	28,5	8,8	44,9	7,59	8,73	2,44
50× 65× 5	554	4,35	19,9	12,5	23,1	11,9	5,11	3,18
50× 65× 7	760	5,97	20,7	13,3	31,0	15,8	6,99	4,31
50×100×10	1 410	11,1	36,7	12,0	141	23,4	22,2	6,17
55× 75× 7	866	6,80	24,0	14,1	47,9	21,8	9,39	5,32
60× 90× 6	869	6,82	28,9	14,1	71,7	25,8	11,7	5,61
60× 90× 8	1 140	8,96	29,7	14,9	92,5	33,0	15,4	7,31
65× 80× 8	1 100	8,66	24,7	17,3	68,1	40,1	12,3	8,41
65×100× 9	1 420	11,1	33,2	15,9	141	46,7	21,0	9,52
65×100×11	1 710	13,4	34,0	16,7	167	55,1	25,3	11,4
65×130×10	1 860	14,6	46,5	14,5	321	54,2	38,4	10,7
75×130× 8	1 590	12,5	43,6	16,5	276	68,3	31,9	11,7
80×120× 8	1 550	12,2	38,3	18,7	226	80,8	27,6	13,2
80×120×10	1 910	15,0	39,2	19,5	276	98,1	34,1	16,2
80×120×12	2 270	17,8	40,0	20,3	323	114	40,4	19,1
90×130×10	2 120	16,6	41,5	21,8	358	141	40,5	20,6
90×130×12	2 510	19,7	42,4	22,6	420	165	48,0	24,4
100×150×10	2 420	19,0	48,0	23,4	552	198	54,1	25,8
100×150×12	2 870	22,6	48,9	24,2	650	232	64,2	30,6
100×200×12	3 480	27,3	70,3	21,0	1 440	247	111	31,3
100×200×14	4 030	31,6	71,2	21,8	1 650	282	128	36,1

Normalne duljine raznokračnih kutnih profila: 3...15 m.

Čelični profili

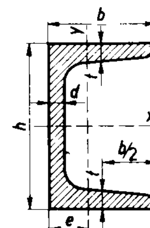
vruće valjani (JUS C.B3.141 — 1962)

Statičke veličine:

I — moment tromosti plohe
W — moment otpora

Polumjer tromosti:

$$i_x = \sqrt{I_x/A}$$
$$i_y = \sqrt{I_y/A}$$

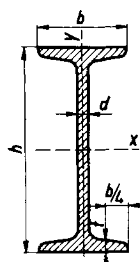


Konstrukcijske mjere — vidi str. 431!

Oznaka* ⊏	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	Presjek S mm²	Duljinska masa kg/m	e mm	I_x 10^4 mm⁴ (= cm⁴)	I_y 10^4 mm⁴ (= cm⁴)	W_x 10^3 mm³ (= cm³)	W_y 10^3 mm³ (= cm³)
6,5	65	42	5,5	7,5	903	7,09	14,2	57,5	14,1	17,7	5,07
8	80	45	6	8	1100	8,64	14,5	106	19,4	26,5	6,36
10	100	50	6	8,5	1350	10,6	15,5	206	29,3	41,2	8,49
12	120	55	7	9	1700	13,4	16,0	364	43,2	60,7	11,1
14	140	60	7	10	2040	16,0	17,5	605	62,7	86,4	14,8
16	160	65	7,5	10,5	2400	18,8	18,4	925	85,3	116	18,3
18	180	70	8	11	2800	22,0	19,2	1350	114	150	22,4
20	200	75	8,5	11,5	3220	25,3	20,1	1910	148	191	27,0
(22)	220	80	9	12,5	3740	29,4	21,4	2690	197	245	33,6
24	240	85	9,5	13	4230	33,2	22,3	3600	248	300	39,6
26	260	90	10	14	4830	37,9	23,6	4820	317	371	47,7
(28)	280	95	10	15	5330	41,8	25,3	6280	399	448	57,2
30	300	100	10	16	5880	46,2	27,0	8030	495	535	67,8

* Treba se kloniti dimenzija u zagradama.

Normalne duljine čeličnih profila ⊏: 4...15 m.



Čelični profili I

vruće valjani (JUS C.B3.131 — 1962)

Statičke veličine:

I — moment tromosti plohe
W — moment otpora

Polumjer tromosti:

$$i_x = \sqrt{I_x/A}$$
$$i_y = \sqrt{I_y/A}$$

Konstrukcijske mjere — vidi str. 431!

Oznaka* I	Dimenzije mm				Presjek	Dulj. masa	Statičke veličine			
	h	b	d	t	S mm²	kg/m	I_x	I_y	W_x	W_y
							10^4 mm⁴ (= cm⁴)		10^3 mm³ (= cm³)	
8	80	42	3,9	5,9	758	5,95	77,8	6,3	19,5	3,00
10	100	50	4,5	6,8	1 060	8,32	171	12,2	34,2	4,88
12	120	58	5,1	7,7	1 420	11,2	328	21,5	54,7	7,41
14	140	66	5,7	8,6	1 830	14,4	573	35,2	81,9	10,7
16	160	74	6,3	9,5	2 280	17,9	935	54,7	117	14,8
18	180	82	6,9	10,4	2 790	21,9	1 450	81,3	161	19,8
20	200	90	7,5	11,3	3 350	26,3	2 140	117	214	26,0
(22)	220	98	8,1	12,2	3 960	31,1	3 060	162	278	33,1
24	240	106	8,7	13,1	4 610	38,2	4 250	221	354	41,7
26	260	113	9,4	14,1	5 340	41,9	5 740	288	442	51,0
(28)	280	119	10,1	15,2	6 110	48,0	7 590	364	543	61,2
30	300	125	10,8	16,2	6 910	54,2	9 800	451	653	72,2
(32)	320	131	11,5	17,3	7 780	61,1	12 510	555	782	84,7
34	340	137	12,2	18,3	8 680	68,1	15 700	674	923	98,4
(36)	360	143	13,0	19,5	9 710	76,2	19 610	818	1 090	114
(38)	380	149	13,7	20,5	10 700	84,0	24 010	975	1 250	131
40	400	155	14,4	21,6	11 800	92,6	29 210	1 160	1 460	149

* Treba se kloniti dimenzija u zagradama.

Normalne duljine čeličnih profila I: 4...15 m.

Konstrukcijske mjere čeličnih profila (po DIN 997)

Sve mjere u mm

Čelični kutni profili

b h	c_1	c_2	d_0 max.	b h	c_1	c_2	d_0 max.
20	12	—	4,3	75	40	—	23
25	15	—	6,4	80	45	—	23
30	17	—	8,4	90	50	—	25
35	18	—	11	100	45	60	25
40	22	—	11	110	45	70	25
45	25	—	13	120	50	80	25
50	30	—	13	130	50	90	25
55	30	—	17	140	50	95	28
60	35	—	17	150	50	105	28
65	35	—	21	160	60	115	28
70	40	—	21	200	60	150	28

Čelični profili [

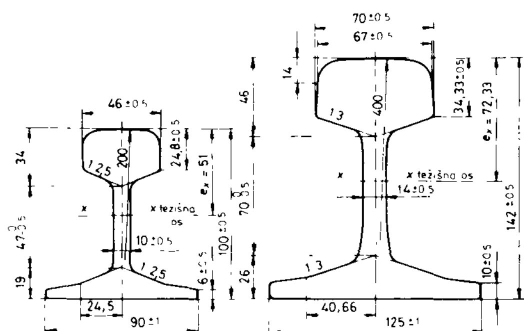
b	c	d_0 max.	h_1	b	c	d_0 max.	h_1
42	25	11	33	75	40	23	151
45	25	13	46	80	45	23	167
50	30	13	64	85	45	25	184
55	30	17	82	90	50	25	200
60	35	17	98	95	50	25	216
65	35	21	115	100	55	25	222
70	40	21	133				

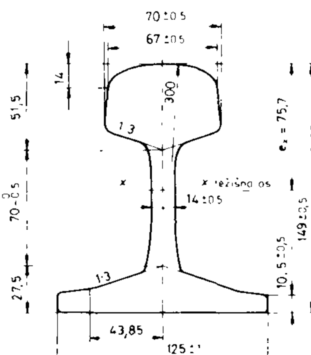
Čelični profili I

b	c	d_0 max.	h_1	b	c	d_0 max.	h_1
42	22	6,4	59	113	60	17	208
50	28	6,4	75	119	62	17	225
58	32	8,4	92	125	64	21	241
66	34	11	109	131	70	21	258
74	40	11	125	137	74	21	274
82	44	13	142	143	76	23	290
90	48	13	159	149	82	23	306
98	52	13	176	155	86	23	323
106	56	17	192				

Željezničke tračnice (duljinske mase veće od 20 kg/m)
(JUS C.K1.021 – 1963)

Oznaka tipa tračnice	Dulj. masa kg/m	Presjek S mm^2	Moment tromosti I_x $10^4\ mm^4 (= cm^4)$	Moment otpora W_x $10^3\ mm^3 (= cm^3)$
22	22,12	2 818	375,5	73,6
45	45,44	5 784	1 552	215
49	49,43	6 297	1 819	240


Tip 22 Tip 45


Tip 49

Čelični limovi

Čelični debeli limovi (JUS C.B4.110 – 1972)

Debljina		Širina mm			Duljina mm	
mm	u skokovima po	400)...700	700)...1500	1500)...3000	...6000	6000)...
5 ... 7 7)...30	0,5 mm 1 mm	u skokovima po 20 mm	u skokovima po 50 mm	u skokovima po 100 mm	u skokovima po 500 mm	u skokovima po 1000 mm
30)...50 50)...60 60)...	2 mm 3 mm 5 mm	u skokovima po 50 mm	u skokovima po 100 mm			

Čelični osrednji limovi (JUS C.B4.111 – 1956)

Debljina 3, 3,5 4, 4,5 4,75 mm
Širina ...1200...1450...1700 mm
Duljina ...4000...5000...6000...7000 mm
Trgovački formati 1000 × 2000 mm 1250 × 2500 mm

Čelični tanki limovi (JUS C.B4.112 – 1962 in 113 – 1978)

Debljina 0,4 ...0,8 mm u razmaku po 0,05 mm
0,9 ...1,1 mm u razmaku po 0,1 mm
1,25...2,75 mm u razmaku po 0,25 mm
Širina 550...600, 750...1000, 1100, 1200 mm
Duljina 1500...2000, 2250, 2500, 3000 mm

Plošna masa čeličnih limova

Debljina mm	Plošna masa kg/m^2	Debljina mm	Plošna masa kg/m^2	Debljina mm	Plošna masa kg/m^2	Debljina mm	Plošna masa kg/m^2
0,40	3,14	2,00	15,70	9	70,65	25	196,2
0,45	3,53	2,25	17,66	10	78,50	26	204,1
0,50	3,93	2,50	19,63	11	86,35	27	211,9
0,55	4,32	2,75	21,59	12	94,20	28	219,8
0,60	4,71	3,00	23,55	13	102,0	29	227,6
0,65	5,10	3,25	25,51	14	109,9	30	235,5
0,70	5,50	3,50	27,48	15	117,8	32	251,2
0,75	5,89	4,0	31,40	16	125,6	34	266,9
0,80	6,28	4,5	35,32	17	133,4	36	282,6
0,85	6,67	5,0	39,25	18	141,3	38	298,3
0,90	7,07	5,5	43,18	19	149,2	40	314,0
0,95	7,46	6,0	47,10	20	157,0	42	329,7
1,00	7,85	6,5	51,03	21	164,8	44	345,4
1,25	9,81	7,0	54,95	22	172,7	46	361,1
1,50	11,78	7,5	58,88	23	180,6	48	376,8
1,75	13,74	8,0	62,80	24	188,4	50	392,5

Pocinčani lim (JUS C.B4.081 – 1984)

Debljina 0,45...4 mm; širina 1000 mm; duljina 2000 (2500) mm.

Čelične bešavne cijevi (ISO)

Materijal cijevi:

čelik Č. 0000 (JUS C.B5.226 — 1968)
čelik Č. 1212 (JUS C.B5.122 — 1968)
čelik Č. 1213 (JUS C.B5.123 — 1968)
čelik Č. 1402 (JUS C.B5.124 — 1968)
čelik Č. 3100 (JUS C.B5.125 — 1968)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar) Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
10	16	1,8	0,632	25	100	100	100	100
	17,2	1,8	0,688	25	100	100	100	100
15	20	2,0	0,890	25	100	100	100	100
	21,3	2,0	0,962	25	100	100	100	100
20	25	2,0	1,13	25	100	100	100	100
	26,9	2,3	1,41	25	100	100	100	100
25	30	2,6	1,77	25	100	100	100	100
	33,7	2,6	2,01	25	100	100	100	100
32	38	2,6	2,29	25	100	100	100	100
	42,4	2,6	2,57	25	100	100	100	100
40	44,5	2,6	2,70	25	100	100	100	100
	48,3	2,6	2,95	25	100	100	100	100
50	57	2,9	3,90	25	100	100	100	100
	60,3	2,9	4,14	25	100	100	100	100
65	76,1	2,9	5,28	25	80	80	100	100
		3,2	5,80	—	—	100	—	—
		3,6	6,49	—	100	—	—	—
80	88,9	3,2	6,81	25	64	80	80	100
		3,6	7,63	—	80	100	100	—
		4,0	8,43	—	100	—	—	—
100	108	3,6	9,33	25	64	80	80	100
		4,0	10,3	—	80	—	100	—
		4,5	11,4	—	—	100	—	—
		5,0	12,7	—	100	—	—	—

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar) Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
100	114,3	3,6	9,90	25	40	64	80	100
		4,0	11,0	—	80	80	100	—
		4,5	12,1	—	—	100	—	—
		5,0	13,5	—	100	—	—	—
125	133	4,0	12,8	25	40	40	80	100
		4,5	14,2	—	64	80	—	—
		5,0	15,8	—	80	—	100	—
		5,6	17,6	—	—	100	—	—
		6,3	19,8	—	100	—	—	—
	139,7	4,0	13,5	25	40	40	80	80
		4,5	14,9	—	—	64	—	100
		5,0	16,6	—	80	80	100	—
		5,6	18,5	—	—	100	—	—
		6,3	20,8	—	100	—	—	—
150	159	4,5	17,1	25	40	40	80	80
		5,0	19,0	—	—	64	—	100
		5,6	21,1	—	80	80	100	—
		6,3	23,8	—	—	100	—	—
		7,1	26,6	—	100	—	—	—
	168,3	4,5	18,1	25	40	40	64	80
		5,0	20,1	—	—	—	80	100
		5,6	22,4	—	64	80	—	—
		6,3	25,3	—	80	—	100	—
		7,1	28,3	—	100	100	—	—
(175)*	193,7	5,4...8,8	25...40					
200	216**	6,0**	31,1	25	40	40	64	80
		6,3	32,6	—	—	—	80	100
		7,1	36,6	—	64	80	—	—
		8,0	41,0	—	80	—	100	—
		8,8	45,0	—	—	100	—	—
		10,0	50,8	—	100	—	—	—

* Nazivni promjer 175 mm JUS ne preporučuje.
** Dimenzije nisu prema ISO.

Čelične bešavne cijevi (nastavak)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar)				
				Č.0000	Č.1212	Č.1213	Č.1402	Č.3100
200	219,1	5,9	31,0	25	40	40	64	80
		6,3	33,2	—	—	—	80	100
		7,1	37,2	—	64	80	—	—
		8,0	41,5	—	80	—	100	—
		8,8	45,4	—	—	100	—	—
		10,0	51,6	—	100	—	—	—
250	267	6,3	40,6	25	40	40	40	80
		7,1	45,6	—	—	—	64	—
		8,0	50,9	—	—	64	80	100
		8,8	55,8	—	64	80	—	—
		10,0	63,4	—	80	—	100	—
		11,0	69,7	—	100	100	—	—
	273	6,3	41,6	25	40	40	40	80
		7,1	46,7	—	—	—	64	—
		8,0	52,1	—	—	64	80	100
		8,8	57,1	—	64	80	—	—
		10,0	64,9	—	80	—	100	—
		11,0	71,4	—	—	100	—	—
		12,5	80,9	—	100	—	—	—
300	318*	7,5*	57,4	16	40	40	40	64
		8,0	61,2	—	—	—	—	80
		8,8	67,1	—	—	—	80	—
		10,0	76,0	—	—	80	—	100
		11,0	83,3	—	80	—	100	—
		12,5	94,2	—	—	100	—	—
		14,2	106	—	100	—	—	—
	323,9	7,1	55,6	16	40	40	40	64
		8,0	62,1	—	—	—	—	80
		8,8	68,1	—	—	—	80	—
		10,0	77,4	—	—	80	—	100
		11,0	85,3	—	80	—	100	—
		12,5	96,7	—	—	100	—	—
		14,2	109	—	100	—	—	—

* Dimenzije nisu po ISO.

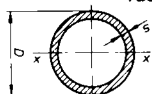
Čelične bešavne cijevi (nastavak)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar)				
				Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
350	355,6	8,0	68,3	16	40	40	40	64
		8,8	74,9	—	—	—	—	80
		10,0	85,2	—	—	—	80	100
		11,0	93,9	—	—	80	—	—
		12,5	107	—	80	—	100	—
		14,2	120	—	—	100	—	—
		16,0	133	—	100	—	—	—
	368	8,0	70,8	16	40	40	40	64
		8,8	77,7	—	—	—	—	80
		10,0	88,3	—	—	—	80	—
		11,0	97,3	—	—	64	—	100
		12,5	110	—	80	80	100	—
		14,2	124	—	—	100	—	—
		16,0	138	—	100	—	—	—
400	406,4	8,8	85,9	16	40	40	40	64
		10,0	97,8	—	—	—	—	80
		11,0	108	—	—	—	80	—
		12,5	122	—	—	80	—	100
		14,2	138	—	80	100	100	—
		17,5	168	—	100	—	—	—
	419	10,0	101	16	40	40	40	80
		11,0	111	—	—	—	64	—
		12,5	126	—	—	64	80	100
		14,2	142	—	80	80	100	—
		16,0	158	—	—	100	—	—
		17,5	173	—	100	—	—	—
500	508	11,0	135	10	40	40	40	40
		12,5	154	—	—	—	—	64
		14,2	173	—	—	—	80	100
		16,0	193	—	64	80	—	—
		17,5	211	—	80	—	100	—
		20,0	241	—	—	100	—	—
		22,2	266	—	100	—	—	—

Od pojedinih vrsta čelika dolaze u obzir cijevi onih dimenzija za koje je označen nazivni tlak.

Precizne čelične cijevi

vučene ili hladno valjane (JUS C.B5.250 – 1983)



Polarni moment tromosti $I_p = 2 I_x$
Polarni moment otpora $W_p = 2 W_x$

Vanjski promjer D mm	Debljina s mm	Presjek S mm²	Duljinska masa m_l kg/m	Moment tromosti I_x 10^4 mm⁴ (= cm⁴)	Moment otpora W_x 10^3 mm³ (= cm³)
10	1	28,3	0,222	0,028 98	0,057 96
	1,5	40,0	0,314	0,037 30	0,074 60
12	1	34,5	0,271	0,052 70	0,087 83
	1,5	49,5	0,388	0,069 58	0,116 0
16	1	47,1	0,370	0,133 1	0,166 4
	1,5	68,3	0,536	0,181 5	0,226 9
	2	88,0	0,690	0,219 9	0,274 9
18	1	53,4	0,419	0,193 6	0,215 1
	1,5	77,7	0,610	0,266 8	0,296 3
	2	100,5	0,789	0,326 7	0,363 0
20	1	59,7	0,468	0,270 1	0,270 1
	1,5	87,2	0,684	0,375 4	0,375 4
	2	113,1	0,888	0,463 7	0,463 7
	2,5	137,4	1,079	0,536 9	0,536 9
	3	160,2	1,258	0,596 8	0,596 8
22	1	66,0	0,518	0,364 5	0,331 4
	1,5	96,6	0,758	0,510 2	0,463 8
	2	125,7	0,986	0,634 6	0,576 9
	2,5	153,1	1,202	0,739 9	0,672 7
	3	179,1	1,406	0,828 2	0,752 9
25	1	75,4	0,592	0,543 8	0,435 0
	1,5	110,7	0,869	0,767 6	0,614 1
	2	144,5	1,134	0,962 8	0,770 2
	2,5	176,7	1,387	1,132	0,905 6
	3	207,3	1,627	1,278	1,022
28	1	84,8	0,666	0,774 0	0,552 9
	1,5	124,8	0,980	1,100	0,785 7
	2	163,4	1,282	1,389	0,992 1
	2,5	200,3	1,572	1,644	1,174
	3	235,6	1,849	1,867	1,334

Precizne čelične cijevi

vučene ili hladno valjane (nastavak)

Vanjski promjer D mm	Debljina s mm	Presjek S mm²	Duljinska masa m_l kg/m	Moment tromosti I_x 10^4 mm⁴ (= cm⁴)	Moment otpora W_x 10^3 mm³ (= cm³)
30	1	91,1	0,715	0,958 9	0,639 3
	1,5	134,3	1,054	1,367	0,911 3
	2	175,9	1,381	1,733	1,155
	2,5	216,0	1,695	2,059	1,373
	3	254,5	1,997	2,347	1,565
32	1	97,4	0,764	1,171	0,731 9
	1,5	143,7	1,128	1,675	1,047
	2	188,5	1,480	2,130	1,331
	2,5	231,7	1,819	2,538	1,586
	3	273,3	2,145	2,904	1,815
35	1	106,8	0,838	1,545	0,882 9
	1,5	157,9	1,239	2,219	1,268
	2	207,3	1,627	2,833	1,619
	2,5	255,2	2,003	3,390	1,937
	3	301,6	2,367	3,894	2,225
	4	389,5	3,058	4,757	2,718
38	1	116,2	0,912	1,991	1,048
	1,5	172,0	1,350	2,869	1,510
	2	226,2	1,776	3,676	1,935
	2,5	278,8	2,189	4,414	2,323
	3	329,9	2,589	5,088	2,678
	4	427,2	3,354	6,259	3,294
40	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
	3	348,7	2,737	6,007	3,004
	4	452,4	3,551	7,419	3,710
45	1,5	205,0	1,609	4,854	2,157
	2	270,2	2,121	6,258	2,781
	2,5	333,8	2,620	7,563	3,361
	3	395,8	3,107	8,773	3,899
	4	515,2	4,044	10,929	4,857
50	1,5	228,5	1,794	6,727	2,691
	2	301,6	2,367	8,701	3,480
	2,5	373,1	2,929	10,551	4,220
	3	443,0	3,477	12,281	4,912
	4	578,0	4,537	15,405	6,162

Precizne čelične cijevi

vučene ili hladno valjane (nastavak)

Vanjski promjer D mm	Debljina s mm	Presjek S mm^2	Duljinska masa m_l kg/m	Moment tromosti I_x 10^4 mm^4 (= cm^4)	Moment otpora W_x 10^3 mm^3 (= cm^3)
56	1,5	256,8	2,016	9,543	3,408
	2	339,3	2,663	12,384	4,423
	2,5	420,2	3,298	15,066	5,381
	3	499,5	3,921	17,595	6,284
	4	653,5	5,129	22,217	7,935
63	1,5	289,8	2,275	13,710	4,352
	2	383,3	3,009	17,846	5,665
	2,5	475,2	3,730	21,777	6,913
	3	565,5	4,439	25,510	8,098
	4	741,4	5,820	32,409	10,289
70	1,5	322,8	2,534	18,942	5,412
	2	427,3	3,354	24,717	7,062
	2,5	530,1	4,161	30,235	8,639
	3	631,5	4,957	35,504	10,144
	4	829,4	6,511	45,326	12,950
80	1,5	369,9	2,904	28,505	7,126
	2	490,1	3,847	37,296	9,324
	2,5	608,7	4,778	45,746	11,437
	3	725,7	5,697	53,866	13,467
	4	955,0	7,497	69,145	17,286
90	2	552,9	4,340	53,550	11,900
	2,5	687,2	5,395	65,823	14,627
	3	820,0	6,436	77,670	17,260
	4	1080,7	8,483	100,127	22,250
100	2	615,8	4,833	73,952	14,790
	2,5	765,8	6,012	91,054	18,211
	3	914,2	7,176	107,624	21,525
	4	1206,4	9,470	139,215	27,843
110	2	678,6	5,327	98,971	17,995
	2,5	844,3	6,628	122,028	22,187
	3	1008,5	7,916	144,435	26,261
	4	1332,0	10,456	187,351	34,064
120	2	741,4	5,820	129,080	21,513
	2,5	922,8	7,244	159,334	26,556
	3	1102,7	8,656	188,809	31,468
	4	1457,7	11,443	245,476	40,913

Čelične cijevi za cijevni navoj

Čelične cijevi propisanih mehaničkih svojstava (JUS C.B5.222 – 1968)

Nazivni promjer		Vanjski promjer	Nazivni tlak (bar) 1 . . . 50		80		100	
mm	col*	mm	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m
6	1/8	10,2	–	–	–	–	2,65	0,493
8	1/4	13,5	–	–	–	–	2,9	0,769
10	3/8	17,2	–	–	–	–	2,9	1,02
15	1/2	21,3	–	–	–	–	3,25	1,45
20	3/4	26,9	–	–	–	–	3,25	1,9
25	1	33,7	–	–	–	–	4,05	2,97
32	1 1/4	42,4	–	–	–	–	4,05	3,84
40	1 1/2	48,3	–	–	–	–	4,05	4,43
50	2	60,3	–	–	–	–	4,50	6,17
65	2 1/2	76,1	–	–	–	–	4,50	7,90
80	3	88,9	–	–	–	–	4,85	10,1
100	4	114,3	–	–	5,4	14,4	6,3	16,8
125	5	139,7	5,4	17,8	7,1	23,3	8,0	25,9
150	6	165,1	5,4	21,2	8,0	30,9	8,8	33,8

Čelične cijevi bez propisanih mehaničkih svojstava (JUS C.B5.225 – 1968)

Nazivni promjer		Vanjski promjer	Poluteške cijevi		Teške cijevi	
mm	col*	mm	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m
6	1/8	10,2	2,0	0,407	2,65	0,493
8	1/4	13,5	2,35	0,650	2,9	0,769
10	3/8	17,2	2,35	0,852	2,9	1,02
15	1/2	21,3	2,65	1,22	3,25	1,45
20	3/4	26,9	2,65	1,58	3,25	1,90
25	1	33,7	3,25	2,44	4,05	2,97
32	1 1/4	42,4	3,25	3,14	4,05	3,84
40	1 1/2	48,3	3,25	3,61	4,05	4,43
50	2	60,3	3,65	5,10	4,5	6,17
65	2 1/2	76,1	3,65	6,51	4,5	7,90
80	3	88,9	4,05	8,47	4,85	10,1
100	4	114,3	4,5	12,1	5,4	14,4
125	5	139,7	4,85	16,2	5,4	17,8
150	6	165,1	4,85	19,2	5,4	21,8

* Napuštena stara oznaka.

Čelična žica

Okrugla vučena čelična žica (JUS C.B6.110 – 1982)

Nazivni promjer mm	Tole-rancija mm	Presjek mm^2	Dulj. masa kg/km
0,1	±0,005	0,00785	0,0617
0,12		0,0113	0,0888
0,14	±0,01	0,0154	0,121
0,16		0,0201	0,158
0,18		0,0254	0,200
0,2	±0,015	0,0314	0,247
0,22		0,0380	0,298
0,24		0,0452	0,355
0,26		0,0531	0,417
0,28		0,0616	0,483
0,31	±0,02	0,0755	0,592
0,34		0,0908	0,713
0,37		0,108	0,844
0,4		0,126	0,986
0,45		0,159	1,25
0,5		0,196	1,54
0,55		0,238	1,87
0,6		0,283	2,22
0,7		0,385	3,02
0,8	±0,03	0,503	3,95
0,9		0,636	4,99
1		0,785	6,17
1,1		0,950	7,46
1,2		1,13	8,88
1,3	±0,04	1,33	10,4
1,4	±0,04	1,54	12,1
1,6	±0,06	2,01	15,8
1,8		2,54	20,0
2		3,14	24,7
2,2	±0,08	3,80	29,8
2,5		4,91	38,5
2,8		6,16	48,3
3,1	±0,10	7,55	59,2
3,4		9,08	71,3
3,8		11,3	89
4		12,6	99
4,2		13,9	109
4,6		16,6	130
5		19,6	154
5,5		23,8	187
6		28,3	222
6,5		33,2	260
7		38,5	302
8		50,3	395
9		63,6	499
10		78,5	617
11	±0,15	95	746
12		113	888
13		133	1040
14		154	1210

*

Okrugla vučena čelična žica od malougljičnog čelika za posebne svrhe **(JUS C.B6.011 – 1980)**

Nazivni promjer 0,1 . . . 14 mm.

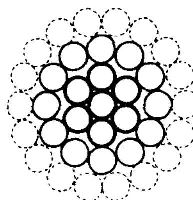
Okrugla čelična žica, vučena ili brušena u tolerancijskom polju **ISO h 11 (JUS C.B6.111 – 1982):**

Nazivni promjer 1 . . . 9,8 mm

Čelična užad

za opće svrhe

Čelična užad bez jezgre



Užad bez jezgre (srži) je spletena od žica istog promjera. Oko središnje žice sukano je u prvom sloju 6 ili u drugome 12, ili još u trećem 18 žica..

Sukanje prvog sloja može biti *desno* (tj. normalno) ili *lijevo*. Sukanje u slijedećim slojevima uvijek je suprotno sukanju u sloju prije toga.

Žice za užad bez jezgre su od čelika nazivne vlačne čvrstoće

R_m = 1570 ili 1770 N/mm²

Žice mogu biti gole ili pocinčane.

Uže 1 × 7 (JUS C.H1.060 – 1982):

Izvedba užeta: 1 + 6 žica

Uže se sastoji od sedam žica od kojih je šest ovijeno oko središnje žice.

Nazivni promjer užeta	Duljinska masa	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja; pri nazivnoj čvrstoći žica R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
d mm	m_l kg/m	F_r kN	F_{min} kN	F_r kN	F_{min} kN
0,6	0,001 81	0,342	0,308	0,385	0,347
0,8	0,003 21	0,608	0,547	0,685	0,617
1	0,005 02	0,950	0,855	1,07	0,963
1,5	0,011 3	2,14	1,92	2,41	2,17
2	0,020 1	3,80	3,42	4,28	3,85
2,5	0,031 4	5,93	5,34	6,69	6,02
3	0,045 2	8,55	7,69	9,63	8,67
3,5	0,061 5	11,6	10,5	13,1	11,8
4	0,080 3	15,2	13,7	17,1	15,4
4,5	0,102	19,2	17,3	21,7	19,5
5	0,126	23,7	21,4	26,8	24,1
6	0,181	34,2	30,8	38,5	34,7
7	0,246	46,5	41,9	52,4	47,2
8	0,321	60,8	54,7	68,5	61,7
9	0,407	76,9	69,2	86,7	78,0
10	0,502	95,0	85,5	107	96,3
12	0,723	137	123	154	139
14	0,984	186	167	210	189
16	1,29	243	219	274	247

Uže 1 × 19 (JUS C.H1.061 – 1982)

Uže se sastoji od 19 (1 + 6 + 12) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, a u drugom 12 žica.

Nazivni promjer užeta	Duljinska masa	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
d mm	m_l kg/m	F_r kN	F_{min} kN	F_r kN	F_{min} kN
1,	0,004 95	0,937	0,825	1,06	0,930
1,5	0,011 1	2,11	1,86	2,38	2,09
2	0,019 8	3,75	3,30	4,23	3,72
2,5	0,031 0	5,86	5,15	6,61	5,81
3	0,044 6	8,43	7,42	9,51	8,37
3,5	0,060 7	11,5	10,1	12,9	11,4
4	0,079 3	15,0	13,2	16,9	14,9
5	0,124	23,4	20,6	26,4	23,2
6	0,178	33,7	29,7	38,1	33,5
7	0,243	45,9	40,4	51,8	45,6
8	0,317	60,0	52,8	67,6	59,5
9	0,401	75,9	66,8	85,6	75,3
10	0,495	93,7	82,5	106	93,0
11	0,599	113	99,8	128	112
12	0,713	135	119	152	134
13	0,837	158	139	179	157
14	0,971	184	162	207	182
15	1,11	211	186	238	209
16	1,27	240	211	271	238
17	1,43	271	238	305	269
18	1,61	304	267	342	301
19	1,79	338	298	382	336
20	1,98	375	330	423	372
21	2,18	413	364	466	410
22	2,40	454	399	512	450
23	2,62	496	436	559	492
24	2,85	540	475	609	536
25	3,10	586	515	661	581

Uže 1 × 37 (JUS C.H1.062 – 1982)

Uže se sastoji od 37 (1 + 6 + 12 + 18) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica i u trećem 18 žica.

Nazivni promjer užeta	Duljinska masa	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
d mm	m_l kg/m	F_r kN	F_{min} kN	F_r kN	F_{min} kN
3	0,044 0	8,32	7,24	9,39	8,16
4	0,078 2	14,8	12,9	16,7	14,5
5	0,122	23,1	20,1	26,1	22,7
6	0,176	33,3	29,0	37,5	32,7
7	0,240	45,3	39,4	51,1	44,4
8	0,313	59,2	51,5	66,8	58,1
9	0,396	74,9	65,2	84,5	73,5
10	0,489	92,5	80,5	104	90,7
12	0,704	133	116	150	131
14	0,958	181	158	204	178
16	1,25	237	206	267	232
18	1,58	300	261	338	294
20	1,96	370	322	417	363
22	2,37	448	389	505	439
24	2,82	533	463	601	522
26	3,31	625	544	705	613
28	3,83	725	631	818	711
30	4,40	832	724	939	816
32	5,01	947	824	1070	929
34	5,65	1070	930	1210	1050
36	6,34	1200	1040	1350	1180

*

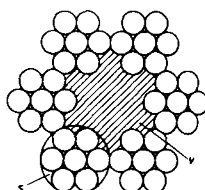
Čelična užad za izvozne uređaje u rudarstvu **JUS C.H1.030/052/055/056 – 1980)**
Čelična užad za vitla i slično **(JUS C.H1.051 – 1968)**
Spojke za čeličnu užad **(JUS C.H1.300/301 – 1975)**
Uške za čeličnu užad **(JUS C.H1.306 – 1983)**
Stremenje **(JUS C.H4.080 – 1975)**

Čelična užad s jezgrom (dušom)

Užad s jezgrom ima 6 žičanih strukova (u izvedbi kao kod užeta bez jezgre, v. str. 443 do 445) sukanih oko vlaknene ili čelične jezgre.*

Sukanje žičanih strukova može biti desno (normalno) ili lijevo.

Prema tome da li je gornji sloj struka sukan desno ili lijevo može uže biti sukano križno (normalno) ili istosmjerno.



s – žičani struk
v – vlaknena jezgra

Uže 6 × 7 (JUS C.H1.070 - 1982)

Izvedba užeta: 6 strukova po 7 (1 + 6) žica, ovijenih oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta	Duljinska masa	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja, pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
d mm	m_l kg/m	F_r kN	F_{min} kN	F_r kN	F_{min} kN
2	0,014 3	–	–	2,61	2,35
3	0,032 2	–	–	5,88	5,29
4	0,057 2	–	–	10,5	9,41
5	0,089 4	–	–	16,3	14,7
6	0,129	–	–	23,5	21,1
7	0,175	–	–	32,0	28,8
8	0,229	37,1	33,4	41,8	37,6
9	0,289	46,9	42,2	52,9	47,6
10	0,357	58,0	52,2	65,3	58,8
11	0,432	70,1	63,1	79,1	71,1
12	0,515	83,4	75.1	94,1	84,7
13	0,604	97,9	88,1	110	99,4
14	0,701	114	102	128	115
16	0,915	148	134	167	151
18	1,16	188	169	212	191
20	1,43	232	209	261	235
22	1,73	280	252	316	285
24	2,06	334	300	376	339
26	2,42	392	353	442	397
28	2,80	454	409	512	461
32	3,66	593	534	669	602
36	4,63	751	676	847	762
40	5,72	927	835	1050	941

* Pri čeličnoj jezgri su duljinska masa i prekidna sila nešto veće.

*

Obično uže 8 × 7 (JUS C.H1.080 – 1982)

Uže 6 × 19 (JUS C.H1.072 - 1982)

Uže se sastoji od 6 strukova po 19 (1 + 6 + 12) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica, a strukovi su ovijeni oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta	Duljinska masa	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja, pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
d mm	m_l kg/m	F_r kN	F_{min} kN	F_r kN	F_{min} kN
3	0,031 1	–	–	5.69	4,90
4	0,055 4	–	–	10,1	8.70
5	0,086 5	–	–	15,8	13,6
6	0,125	–	–	22,8	19.6
7	0,170	–	–	31,0	26.7
8	0,221	35,9	30,9	40,5	34,8
9	0,280	45,4	39.1	51,2	44,1
10	0.346	56,1	48,2	63,3	54,4
11	0,419	67,9	58,4	76,5	65,8
12	0,498	80,8	69,5	91,1	78,3
13	0.585	94,8	81,5	107	91,9
14	0,678	110	94,6	124	107
16	0,886	144	124	162	139
18	1,12	182	156	205	176
20	1,38	224	193	253	218
22	1,67	272	234	306	263
24	1,99	323	278	364	313
26	2,34	379	326	428	368
28	2,71	440	378	496	426
32	3,54	575	494	648	557
36	4,48	727	625	820	705
40	5,54	898	722	1010	870
44	6.70	1090	934	1220	1050
48	7,97	1290	1110	1460	1250
52	9,36	1520	1300	1710	1470
56	10,9	1760	1510	1980	1710

*

Uže 6 × 19 – ispunjeno žicama (JUS C.H1.086 – 1982)
Uže 8 × 19 – ispunjeno žicama (JUS C.H1.088 – 1982)
Uže Warrington 6 × 19 (JUS C.H1.090 – 1982)
Uže Warrington 8 × 19 (JUS C.H1.096 – 1982)
Uže Seale 6 × 19 (JUS C.H1.100 – 1982)
Uže Seale 8 × 19 (JUS C.H1.104 – 1982)

Uže 6 × 37 (JUS C.H1.074 – 1982)

Uže se sastoji od 6 strukova po 37 (1 + 6 + 12 + 18) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica, u trećem 18 žica, a strukovi su ovijeni oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta	Duljinska masa	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja, pri nazivnoj čvrstoći žica R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
d mm	m_l kg/m	F_r kN	F_{min} kN	F_r kN	F_{min} kN
6	0,125	–	–	22,8	18,8
7	0,170	–	–	31,0	25,6
8	0,221	35,9	29,6	40,5	33,4
9	0,280	45,4	37,5	51,2	42,3
10	0,346	56,1	46,3	63,3	52,2
11	0,419	67,9	56,0	76,5	63,1
12	0,498	80,8	66,6	91,1	75,1
13	0,585	94,8	78,2	107	88,2
14	0,678	110	90,7	124	102
16	0,886	144	118	162	134
18	1,12	182	150	205	169
20	1,38	224	185	253	209
22	1,67	272	224	306	253
24	1,99	323	267	364	301
26	2,34	379	313	428	353
28	2,71	440	363	496	409
32	3,54	575	474	648	534
36	4,48	727	600	820	676
40	5,54	898	741	1010	835
44	6,70	1090	896	1220	1010
48	7,97	1290	1070	1460	1200
52	9,36	1520	1250	1710	1410
56	10,9	1760	1450	1980	1640
60	12,5	2020	1670	2280	1880
64	14,2	2300	1900	2590	2140

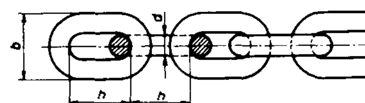
*

***Obično uže 8 × 37* (JUS C.H1.084 – 1982)**
***Uže Seale 6 × 37* (JUS C.H1.102 – 1982)**

***Uže 6 × 12 + 7 vlaknastih jezgri* (JUS C.H1.076 – 1982)**
***Uže 6 × 24 + 7 vlaknastih jezgri* (JUS C.H1.078 – 1982)**

***Uže Warrington-Seale 6 × 31* (JUS C.H1.106 – 1982)**
***Uže Warrington-Seale 6 × 36* (JUS C.H1.108 – 1982)**
***Uže Warrington-Seale 8 × 36* (JUS C.H1.112 – 1982)**

Čelični lanci



Lanci za opću upotrebu (JUS C.H4.020 – 1978)
(kalibrirani)

Nazivni promjer*	Korak	Širina članka	Duljinska masa	Opterećenje dozvoljeno	Opterećenje ispitno** LO, LC	LP
d mm	h mm	b mm	m_l kg/m	F_{dop} kN	F_{isp} kN	F_{isp} kN
5***	18,5	17	0,500	–	–	–
6***	18,5	20	0,750	–	–	–
4	16	14	0.320	1.47	2,94	–
5	18,5	17	0.500	2,45	4.91	6,18
6	18.5	20	0,750	3,43	6.87	8,83
7	22	23	1,00	4.41	8.83	12,4
8	24	26	1,35	6,18	12,4	15,7
9	27	30	1,80	7,85	15,7	19,6
(9,5)	27	31	1,90	8.34	16,7	–
10	28	34	2,25	9.81	19.6	24,5
(11)	31	36	2,70	11,0	22,0	31,4
13	36	44	3,80	15,7	31,4	.41,6
14	41	47	4,40	–	–	49,1
16	45	54	5,80	24,5	49,1	61,8
18	50	60	7,30	30,9	61,8	78,5
20	56	67	9,00	39,2	78,5	98,1
23	64	77	12,0	49,1	98,1	131
26	73	87	15,0	61,8	124	167
28	78	94	17,5	73,6	147	196
30	84	101	20,0	83,4	167	220
33	92	112	24,5	98,1	196	259
36	101	122	29,0	123	245	294
39	109	132	34,0	137	275	353
42	118	142	40,0	167	334	392
45	126	152	45,5	186	373	439
48	134	162	52,0	206	412	491
51	143	172	58,5	245	490	549
54	151	182	65,5	275	549	618
57	160	192	73,0	294	589	657
60	168	202	81,0	329	657	697

* Treba se kloniti nazivnih promjera u zagradama.
** LO-obični lanci, LC-cementirani lanci, LP-poboljšani lanci.
*** Samo za ručnu upotrebu.

Lanci za dizala (JUS C.H4.021 – 1978)
(kalibrirani)

Nazivni promjer d mm	Korak h mm	Širina članka b mm	Duljinska masa m_l kg/m	Opterećenje dozvoljeno F_{dop} kN	Opterećenje ispitno F_{isp} kN
13	36	42	3,80	15,7	31,4
16	45	52	5,80	24,5	49,1
18	50	58	7,30	30,9	61,8
20	56	65	9,00	39,2	78,5
23	64	74	12,0	49,1	98,1

Lanci za dizala (JUS C.H4.022/023/024 – 1978) kvalitetni razred: 5, 6, 8

Nazivni promjer* d mm	Korak* h mm	Širina članka vanjska b maks. mm	Širina članka unutarnja b_n min. mm	Duljinska masa m_l kg/m
4	12	13,7	5	0,35
5	15	16,9	6	0,54
(5)	(18,5)	16,9	6	0,50
6	18	20,2	7,2	0,78
(6)	(18,5)	20,2	7,2	0,77
7	21	23,6	8,4	1,07
(7)	(22)	23,6	8,4	1,05
8	24	27	9,6	1,40
9	27	30,4	10,8	1,75
10	28	34	12	2,25
11	31	37,4	13,2	2,70
13	36	44,2	15,6	3,80
14	41	47,6	16,8	4,40
16	45	54,4	19,2	5,75
18	50	63,0	21,6	7,30

* Dimenzije u zagradama treba izbjegavati.

*

Komadni lanci za opću upotrebu s kratkim člancima (JUS C.H4.025 – 1978).
Lanci za transportere s dugim člancima (JUS C.H4.030 – 1978).
Lanci za transportere sa srednje dugim člancima (JUS C.H4.031 – 1978).

ALUMINIJSKI POLUPROIZVODI

Mase poluproizvoda po jedinici duljine (kg/m) ili jedinici površine (kg/m²) izračunane su s obzirom na prosječnu gustoću aluminija od 2700 kg/m³.

Aluminijske šipke i žice

Okrugle šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane
(JUS C.C3.030/031/130/131 — 1963)

Promjer* mm vučeno al	vučeno sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Promjer* mm vučeno al	vučeno sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
1	1	—	0,785	0,002 12	20	20	20	314,2	0,848
1,2	—	—	1,131	0,003 05	21	—	—	346,4	0,935
1,4	—	—	1,539	0,004 16	22	—	—	380,1	1,03
1,5	—	—	1,767	0,004 77	23	—	—	415,5	1,12
1,6	—	—	2,011	0,005 43	24	—	—	452,4	1,22
1,8	—	—	2,545	0,006 87	25	25	25	490,9	1,33
2,0	2	—	3,142	0,008 48	26	—	—	530,9	1,43
2,2	—	—	3,801	0,010 3	27	—	—	572,6	1,55
2,5	—	—	4,909	0,013 3	28	—	—	615,8	1,66
2,8	—	—	6,158	0,016 6	29	—	—	660,5	1,78
3,0	—	—	7,069	0,019 1	30	30	30	706,9	1,91
3,2	—	—	8,042	0,021 7	32	32	—	804,2	2,17
3,5	—	—	9,621	0,026 0	34	—	—	907,9	2,45
3,8	—	—	11,34	0,030 6	35	35	35	962,1	2,60
4,0	4	—	12,57	0,033 9	36	—	—	1 018	2,75
4,5	—	—	15,90	0,042 9	38	38	—	1 134	3,06
5,0	5	5	19,63	0,053 0	40	40	40	1 257	3,39
5,5	—	—	23,76	0,064 1	42	42	—	1 385	3,74
6,0	6	6	28,27	0,076 3	45	45	45	1 590	4,29
7,0	—	7	38,48	0,104	48	48	—	1 810	4,89
8,0	8	8	50,27	0,136	50	50	50	1 963	5,30
9,0	—	—	63,62	0,172	52	52	—	2 124	5,73
10	10	10	78,54	0,212	53	—	—	2 206	5,96
11	—	—	95,03	0,257	54	—	—	2 290	6,18
12	12	—	113,1	0,305	55	55	55	2 376	6,41
13	—	—	132,7	0,358	56	—	—	2 463	6,65
14	—	—	153,9	0,416	57	—	—	2 552	6,89
15	15	15	176,7	0,477	58	58	—	2 642	7,13
16	—	—	201,1	0,543	60	60	60	2 827	7,63
17	—	—	227,0	0,613	65	65	65	3 318	8,96
18	—	—	254,5	0,687	70	70	70	3 848	10,4
19	—	—	283,5	0,766	75	75	75	4 418	11,9

(Nastavak na str. 452)

* Vrijednosti »al« vrijede za poluproizvode od aluminija, a vrijednosti »sl« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Okrugle šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (nastavak).

Promjer* mm vučeno al	sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Promjer* mm vučeno al sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
80	80	80	5 027	13,6	—	170	22 698	61,3
90	90	90	6 362	17,2	—	180	25 447	68,7
95	—	—	7 088	19,1	—	190	28 353	76,6
100	100	100	7 854	21,2	—	200	31 416	84,8
—	110	110	9 503	25,7	—	210	34 636	93,5
—	120	120	11 310	30,5	—	220	38 013	103
—	—	130	13 273	35,8	—	230	41 548	112
—	—	140	15 394	41,6	—	240	45 239	122
—	—	150	17 672	47,7	—	250	49 087	133
—	—	160	20 106	54,3				

* Vidi opasku na str. 451!

Kvadratne šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (JUS C.C3.034/035/134/135 — 1963)

Debljina* mm vučeno al	sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Debljina* mm vučeno al	sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
2	—	—	4	0,010 8	22	22	—	484	1,31
3	—	—	9	0,024 3	—	24	—	576	1,56
4	4	—	16	0,043 2	25	—	25	625	1,69
—	4,5	—	20,25	0,054 7	—	27	—	729	1,97
5	5	—	25	0,067 5	28	—	—	784	2,12
—	5,5	—	30,25	0,081 7	30	30	30	900	2,43
6	6	6	36	0,097 2	32	—	—	1 024	2,76
7	7	—	49	0,132	35	—	—	1 225	3,31
8	8	8	64	0,173	40	—	40	1 600	4,32
—	9	—	81	0,219	45	—	—	2 025	5,47
10	10	10	100	0,273	50	—	50	2 500	6,75
—	11	—	121	0,327	55	—	—	3 025	8,17
12	12	—	144	0,389	60	—	60	3 600	9,72
—	14	—	196	0,529	65	—	—	4 225	11,4
15	—	15	225	0,608	70	—	70	4 900	13,2
16	—	—	256	0,691	75	—	—	5 625	15,2
—	17	—	289	0,780	—	—	80	6 400	17,3
18	—	—	324	0,875	—	—	100	10 000	27,3
—	19	—	361	0,975	—	—	120	14 400	38,9
20	—	20	400	1,08	—	—	150	22 500	60,8

* Vidi opasku na str. 451!

Šesterokutne šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (JUS C.C3.036/037/136/137 — 1963)

Otvor ključa* mm vučeno al	sl	preš. al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Otvor ključa* mm vučeno al	sl	preš. al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
3	3	—	7,794	0,021 0	25	—	25	541,3	1,46
3,5	3,5	—	10,61	0,028 6	27	27	—	631,3	1,70
4	4	—	13,86	0,037 4	28	—	—	678,9	1,83
4,5	4,5	—	17,54	0,047 3	30	30	30	779,4	2,10
5	5	—	21,65	0,058 5	32	32	—	886,8	2,39
5,5	5,5	—	26,20	0,070 7	33	—	—	943,0	2,55
6	6	6	31,18	0,084 2	35	—	—	1 060	2,86
7	7	—	42,44	0,115	36	36	—	1 122	3,03
8	8	8	55,43	0,150	38	—	—	1 250	3,38
9	9	—	70,15	0,189	—	—	40	1 384	3,74
10	10	10	86,60	0,234	41	41	—	1 456	3,93
11	11	—	104,8	0,283	42	—	—	1 527	4,12
12	12	—	124,7	0,337	45	—	—	1 753	4,73
13	—	—	146,4	0,394	46	46	—	1 833	4,95
14	14	—	169,7	0,458	50	50	50	2 165	5,85
—	—	15	194,8	0,526	55	—	—	2 620	7,07
17	17	—	250,3	0,676	60	—	60	3 118	8,42
18	—	—	280,6	0,750	—	—	70	4 243	11,46
19	19	—	312,6	0,844	—	—	80	5 542	14,96
20	—	20	346,0	0,934	—	—	100	8 660	23,42
22	22	—	419,2	1,13	—	—	120	12 470	36,70
24	24	—	498,8	1,35	—	—	150	19 481	52,60

* Vrijednosti »al« vrijede za poluproizvode od aluminija, a vrijednosti »sl« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (JUS C.C3.200/201 — 1963)

Širina × debljina mm vučeno	prešano	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Širina × debljina mm vučeno	prešano	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
5×2	—	10	0,027	6×4	—	24	0,065
5×3	—	15	0,041	6×5	—	30	0,081
5×4	—	20	0,054	8×2	—	16	0,043
6×2	—	12	0,032	8×3	—	24	0,065
6×3	—	18	0,049	8×4	—	32	0,086

(Nastavak na str. 454 i 455.)

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Širina × debljina mm		Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Širina × debljina mm		Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
vučeno	prešano			vučeno	prešano		
8 × 5	8 × 5	40	0,108	25 × 3	—	75	0,202
8 × 6	8 × 6	48	0,130	25 × 4	—	100	0,270
10 × 2	—	20	0,054	25 × 5	25 × 5	125	0,338
10 × 3	—	30	0,081	25 × 6	25 × 6	150	0,405
10 × 4	—	40	0,108	25 × 8	25 × 8	200	0,540
10 × 5	10 × 5	50	0,135	25 × 10	25 × 10	250	0,675
10 × 6	10 × 6	60	0,162	25 × 12	25 × 12	300	0,810
10 × 8	10 × 8	80	0,216	25 × 16	25 × 16	400	1,08
12 × 2	—	24	0,065	25 × 20	—	500	1,35
12 × 3	—	36	0,097	30 × 4	—	120	0,324
12 × 4	—	48	0,130	30 × 5	30 × 5	150	0,405
12 × 5	12 × 5	60	0,162	30 × 6	30 × 6	180	0,486
12 × 6	12 × 6	72	0,194	30 × 8	30 × 8	240	0,648
12 × 8	12 × 8	96	0,259	30 × 10	30 × 10	300	0,810
12 × 10	—	120	0,324	30 × 12	30 × 12	360	0,972
16 × 2	—	32	0,086	30 × 16	30 × 16	480	1,30
16 × 3	—	48	0,130	30 × 20	30 × 20	600	1,62
16 × 4	—	64	0,173	30 × 25	—	750	2,03
16 × 5	16 × 5	80	0,216	40 × 5	40 × 5	200	0,540
16 × 6	16 × 6	96	0,259	40 × 6	40 × 6	240	0,648
16 × 8	16 × 8	128	0,346	40 × 8	40 × 8	320	0,864
16 × 10	16 × 10	160	0,432	40 × 10	40 × 10	400	1,08
16 × 12	—	192	0,518	40 × 12	40 × 12	480	1,30
20 × 2	—	40	0,108	40 × 16	40 × 16	640	1,73
20 × 3	—	60	0,162	40 × 20	40 × 20	800	2,16
20 × 4	—	80	0,216	40 × 25	40 × 25	1 000	2,70
20 × 5	20 × 5	100	0,270	40 × 30	—	1 200	3,24
20 × 6	20 × 6	120	0,324	—	50 × 5	250	0,675
20 × 8	20 × 8	160	0,432	50 × 6	50 × 6	300	0,810
20 × 10	20 × 10	200	0,540	50 × 8	50 × 8	400	1,08
20 × 12	20 × 12	240	0,648	50 × 10	50 × 10	500	1,35
20 × 16	—	320	0,864	50 × 12	50 × 12	600	1,62
				50 × 16	50 × 16	800	2,16

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Širina × debljina mm		Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Širina × debljina mm		Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
vučeno	prešano			vučeno	prešano		
50 × 20	50 × 20	1 000	2,70	—	125 × 10	1 250	3,38
50 × 25	50 × 25	1 250	3,38	—	125 × 12	1 500	4,05
50 × 30	50 × 30	1 500	4,05	125 × 16	125 × 16	2000	5,40
50 × 40	—	2000	5,40	125 × 20	125 × 20	2 500	6,75
—	60 × 6	360	0,972	125 × 25	125 × 25	3 125	8,44
60 × 8	60 × 8	480	1,30	125 × 30	125 × 30	3 750	10,13
60 × 10	60 × 10	600	1,62	125 × 40	125 × 40	5 000	13,50
60 × 12	60 × 12	720	1,94	—	125 × 50	6 250	16,87
60 × 16	60 × 16	960	2,59	—	125 × 60	7 500	20,25
60 × 20	60 × 20	1 200	3,24	—	160 × 10	1 600	4,32
60 × 25	60 × 25	1 500	4,05	—	160 × 12	1 920	5,18
60 × 30	60 × 30	1 800	4,86	—	160 × 16	2 560	6,91
60 × 40	60 × 40	2 400	6,48	160 × 20	160 × 20	3 200	8,64
—	80 × 8	640	1,73	160 × 25	160 × 25	4000	10,80
80 × 10	80 × 10	800	2,16	160 × 30	160 × 30	4 800	12,96
80 × 12	80 × 12	960	2,59	160 × 40	160 × 40	6 400	17,28
80 × 16	80 × 16	1 280	3,45	—	160 × 50	8 000	21,60
80 × 20	80 × 20	1 600	4,32	—	160 × 60	9 600	25,92
80 × 25	80 × 25	2 000	5,40	—	180 × 10	1 800	4,86
80 × 30	80 × 30	2 400	6,48	—	180 × 12	2 160	5,83
80 × 40	80 × 40	3 200	8,64	—	180 × 16	2 880	7,78
—	80 × 50	4000	10,80	—	180 × 20	3 600	9,72
—	100 × 10	1 000	2,70	—	180 × 25	4 500	12,15
100 × 12	100 × 12	1 200	3,24	—	180 × 30	5 400	14,58
100 × 16	100 × 16	1 600	4,32	—	180 × 40	7 200	19,44
100 × 20	100 × 20	2000	5,40	—	200 × 10	2 000	5,40
100 × 25	100 × 25	2 500	6,75	—	200 × 12	2 400	6,48
100 × 30	100 × 30	3000	8,10	—	200 × 16	3 200	8,64
100 × 40	100 × 40	4000	10,80	—	200 × 20	4000	10,80
—	100 × 50	5000	13,50	—	200 × 25	5 000	13,50
—	100 × 60	6000	16,20	—	200 × 30	6000	16,20
				—	200 × 40	8 000	21,60

Jednakokračni kutni profili od aluminija i aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.202 — 1963)

Duljina krakova mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Duljina krakova mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
10	1	19,2	0,051 8	40	2	156,8	0,423
10	1,5	28,2	0,076 1	40	4	307,0	0,828
10	2	36,8	0,099 3	50	4	387	1,045
12	1	23,2	0,062 6	50	5	480	1,296
12	1,2	27,6	0,074 5	60	5	580	1,565
15	1,5	43,2	0,116 5	60	6	691	1,86
15	2	56,8	0,153 2	80	6	931	2,51
15	2,5	70,0	0,189	80	8	1 229	3,32
20	2	76,8	0,207	100	8	1 549	4,18
20	2,5	95,0	0,256	100	10	1 920	5,18
20	3	112,8	0,304	125	10	2 420	6,53
25	2	96,8	0,261	125	12	2 885	7,78
25	2,5	120,0	0,324	140	12	3 245	8,76
30	3	172,8	0,466	140	14	3 763	10,15
30	4	227,0	0,612	160	12	.3 725	10,06
				160	16	4 915	13,27

Profili ⊤ od aluminija i aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.204 — 1963)

Širina noge mm	Visina mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Širina noge mm	Visina mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
20	20	1,6	62,6	0,169	30	30	3	175	0,472
20	20	2	78	0,212	30	45	3	220	0,594
20	30	2	98	0,264	30	45	4	291	0,785
20	30	3	145	0,391	40	25	2,5	159	0,429
25	16	1,6	64	0,173	40	25	3	190	0,513
25	16	2	80	0,216	40	40	3	235	0,634
25	25	2	98	0,264	40	40	4	311	0,839
25	25	2,5	121	0,328	50	50	3	295	0,796
30	30	2	118	0,318	50	50	4	391	1,055
30	30	2,5	146	0,394	50	50	5	485	1,310

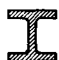
Profili ⊤ od aluminija i aluminijskih slitina, prešani (nastavak)

Širina noge mm	Visina mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Širina noge mm	Visina mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
60	40	4	391	1,055	125	80	10	1 991	5,38
60	40	5	485	1,310	125	125	10	2 441	6,59
60	60	5	585	1,58	125	125	12	2 915	7,87
60	60	6	699	1,87	140	90	10	2 241	6,05
80	50	5	635	1,71	140	90	12	2 675	7,22
80	50	6	759	2,05	140	140	12	3 275	8,84
80	80	6	939	2,53	140	140	14	3 804	10,27
80	80	8	1 242	3,35	160	100	12	3 035	8,19
100	100	8	1 562	4,23	160	100	14	3 524	9,52
100	100	10	1 941	5,24	160	160	14	4 364	11,77
125	80	8	1 602	4,33	160	160	16	4 969	13,41

Profili ⊏ od aluminija i aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.203 — 1963)

Visina mm	Širina noge mm	Deb-ljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m	Visina mm	Širina noge mm	Deb-ljina* mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
25	16	1,6	87,1	0,235	80	50	4	693	1,87
32	16	2	122	0,329	80	50	5	860	2,32
32	20	2	138	0,372	100	50	5	960	2,59
40	20	2	154	0,416	100	50	6	1 143	3,08
40	25	2,5	215	0,581	125	80	6	1 653	4,47
40	30	3	286	0,772	125	80	8	2 178	5,88
40	40	4	455	1,228	140	90	8	2 458	6,64
50	25	2,5	240	0,648	140	90	10	3 041	8,21
50	30	3	316	0,853	160	80	8	2 458	6,64
50	40	4	495	1,335	160	80	10	3 041	8,21
60	30	4	455	1,228	160	100	8	2 778	7,50
60	30	5	560	1,51	160	100	10	3 441	9,30
60	40	4	535	1,44	200	100	12(10)	4 219	11,39
60	40	5	660	1,78	200	125	16(12)	6 121	16,53
80	40	4	615	1,66	250	100	16(12)	5 921	15,99
80	40	5	760	2,05	250	125	16(12)	6 721	18,15

* Vrijednosti u zagradama vrijede za debljinu noge.



Profili I *od aluminija i aluminijskih slitina, prešani*
(JUS C.C3.205 — 1963)

Visina mm	Širina noge mm	Debljina mm	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
25	16	1,6	88,2	0,238
25	25	1,6	117	0,316
30	20	2	135	0,364
30	30	2	175	0,473
40	25	2,5	218	0,588
40	40	4	461	1,245
50	30	3	319	0,861
50	50	3	439	1,185
50	50	5	721	1,947
60	40	4	541	1,46
60	50	4	621	1,68
60	60	5	871	2,35
80	50	4	701	1,89
80	50	5	871	2,35
80	80	4	941	2,54
80	80	5	1 171	3,16
100	100	5	1 471	3,97
100	100	6	1 758	4,74
125	80	6	1 668	4,50
125	80	8	2 205	5,95
125	125	6	2 208	5,96
125	125	8	2 925	7,90
140	90	8	2 485	6,72
140	90	10	3 083	8,33
140	140	8	3 285	8,86
140	140	10	4 083	11,02
160	100	8	2 805	7,57
160	100	10	3 483	9,42
160	160	8	3 765	10,17
160	160	10	4 683	12,64
200	125	10	4 383	11,85
200	125	12	5 231	14,12
200	200	10	5 883	15,90
200	200	12	7 031	18,98
250	160	12	6 671	18,01
250	160	16	8 820	23,80
250	250	12	8 831	23,84
250	250	16	11 700	31,60

Toplo valjani lim *od aluminija i aluminijskih slitina*
(JUS C.C4.019 — 1963)

Debljina mm	Širina mm	Plošt. masa kg/m²	Debljina mm	Širina mm	Plošt. masa kg/m²
4	do 2 500	10,8	15	do 3 000	40,5
5	do 2 500	13,5	20	do 3 000	54,0
6	do 3 000	16,2	25	do 1 000	67,5
8	do 3 000	21,6	30	do 1 000	81,0
10	do 3 000	27,0	40	do 1 000	108
12	do 3 000	32,4			

Duljine: do 10 000 mm.

*

Hladno valjane trake od aluminija i aluminijskih slitina (JUS C.C4.051/151 — 1963).
Hladno valjani lim od aluminija i aluminijskih slitina (JUS C.C4.050/150 — 1963).

Okrugle cijevi *od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane*
(JUS C.C5.030/031/130/131 — 1966)

Vanj. prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm vučeno al	vučeno sl	prešano al, sl	Presjek mm²	Dulj. masa kg/m
4	0,5	0,5	—	5,49	0,015
	0,8	0,8	—	8,04	0,022
	1	—	—	9,42	0,025
5	0,5	0,5	—	7,07	0,019
	0,8	0,8	—	10,55	0,029
	1	1	—	12,57	0,034
8	0,5	0,5	—	11,78	0,032
	0,8	0,8	—	18,10	0,049
	1	1	—	22,01	0,059
	1,2	1,2	—	25,64	0,069
	1,6	1,6	—	32,17	0,086
10	0,5	—	—	14,92	0,040
	0,8	0,8	—	23,12	0,062
	1	1	—	28,27	0,076
	1,2	1,2	—	33,18	0,090
	1,6	1,6	—	42,22	0,114
	2	2	—	50,27	0,136
12	0,5	—	—	18,06	0,049
	0,8	0,8	—	28,15	0,076
	1	1	—	34,46	0,093
	1,2	1,2	—	40,72	0,110
	1,6	1,6	—	52,28	0,141
	2	2	—	62,83	0,170
16	0,5	—	—	24,35	0,066
	0,8	0,8	—	38,20	0,103
	1	1	—	47,12	0,127
	1,2	1,2	—	55,80	0,151
	1,6	1,6	—	72,38	0,195
	2	2	—	87,97	0,238
	2,5	2,5	—	106,0	0,286
20	0,5	—	—	30,63	0,083
	0,8	0,8	—	48,26	0,130
	1	1	—	59,69	0,161
	1,2	1,2	—	70,87	0,191
	1,6	1,6	—	92,49	0,250
	2	2	—	113,1	0,305
	2,5	2,5	—	137,4	0.371
	3	3	—	160,2	0,433
25	0,5	—	—	38,49	0.104
	0,8	0,8	—	60,82	0,164
	1	1	—	74,40	0,204
	1,2	1,2	1,2	89,72	0,242
	1,6	1,6	1,6	117,6	0,318
	2	2	2	144,5	0,390
	2,5	2,5	2,5	176,7	0,477
	3	3	3	207,4	0.560
32	0,8	0,8	—	78,41	0,212
	1	1	—	97,39	0,263
	1,2	1,2	1,2	116,1	0,314
	1,6	1,6	1,6	152,8	0,413
	2	2	2	188,5	0,509
	2,5	2,5	2,5	231,7	0,626
	3	3	3	273,3	0,738
	4	4	4	351,9	0,950
	—	5	5	424,1	1,15
	—	6	6	490,1	1,32
	—	8	8	603,2	1,63

(Nastavak – str. 460 i 461.)

* Uzeti su u obzir samo promjeri standardnih brojeva osnovnog reda R 10.
** Vrijednosti »al« vrijede za cijevi od aluminija, a vrijednosti »sl« za cijevi od aluminijskih slitina.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane (nastavak)

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm vučeno al sl	Debljina stijenke** mm preš. al sl	Presjek mm^2	Dulj. masa kg/m
40	0,8 —	—	98,68	0,266
	1 1	—	122,7	0,331
	1,2 1,2	—	146,3	0,395
	1,6 1,6	—	193,0	0,521
	2 2	2	238,9	0,645
	2,5 2,5	2,5	294,7	0,795
	3 3	3	348,9	0,942
	4 4	4	452,6	1,22
	5 5	5	549,6	1,48
	— 6	6	640,9	1,73
	— 8	8	804,3	2,17
50	1 1	—	153,9	0,416
	1,2 1,2	—	183,9	0,497
	1,6 1,6	—	243,3	0,657
	2 2	—	301,6	0,814
	2,5 2,5	2,5	373,1	1,01
	3 3	3	444,0	1,20
	4 4	4	578,1	1,56
	5 5	5	706,9	1,91
	— 6	6	829,4	2,24
	— 8	8	1055	2,85
63	1,2 1,2	—	233,0	0,629
	1,6 1,6	—	308,6	0,833
	2 2	—	383,3	1,04
	2,5 2,5	—	475,2	1,28
	3 3	—	565,5	1,53
	4 4	4	741,2	2,00
	5 5	5	911,1	2,46

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm vučeno al sl	Debljina stijenke** mm preš. al sl	Presjek mm^2	Dulj. masa kg/m
63	— 6	6	1074	2,90
	— 8	8	1382	3,73
	— 10	10	1665	4,50
80	1,6 1,6	—	394,1	1,06
	2 2	—	490,1	1,31
	2,5 2,5	—	608,8	1,64
	3 3	—	727,7	1,96
	4 4	4	955,1	2,58
	5 5	5 5	1178	3,18
	6 6	6 6	1385	3,74
	8 8	8 8	1810	4,89
	— 10	10 10	2199	5,94
100	2 2	— —	615,8	1,66
	2,5 2,5	— —	765,8	2,07
	3 3	— —	914,2	2,47
	4 4	4 4	1206	3,26
	5 5	5 5	1492	4,03
	6 6	6 6	1772	4,78
	8 8	8 8	2312	6,24
	10 10	10 10	2827	7,63
	— —	12 —	3318	8,96
125	3 3	— —	1150	3,11
	4 4	4 4	1521	4,11
	5 5	5 5	1885	5,09
	6 6	6 6	2243	6,06
	8 8	8 8	2941	7,94
	10 10	10 10	3613	9,76
	12 12	12 —	4260	11,5

* ** Vidi primjedbe na str. 459.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane (nastavak)

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm vučeno al sl	Debljina stijenke** mm preš. al, sl	Presjek mm^2	Dulj. masa kg/m
160	3 —	— —	1480	4,00
	4 —	4 4	1960	5,29
	5 —	5 5	2425	6,55
	6 —	6 6	2903	7,84
	8 —	8 8	3820	10,3
	10 —	10 10	4712	12,7
	12 —	12 —	5580	15,1
200	4 —	4 4	2463	6,65
	5 —	5 5	3063	8,27

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm vučeno al sl	Debljina stijenke** mm preš. al, sl	Presjek mm^2	Dulj. masa kg/m
200	6 —	6 6	3657	9,87
	8 —	8 8	4824	13,0
	10 —	10 10	5969	16,1
	12 —	12 —	7087	19,1
250	5 —	5 5	3849	10,4
	6 —	6 6	4599	12,4
	8 —	8 8	6082	16,4
	10 —	10 10	7540	20,4
	12 —	12 —	8972	24,2

* ** Vidi primjedbe na str. 459!

*

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, koje imaju promjere standardnih brojeva osnovnih redova R 20 i R 40

Vanjski promjer mm		Debljine stijenke mm			
		vučene		prešane	
R 20	R 40	aluminij	alum. slitine	aluminij	alum. slitine
	6	0,5 ... 1,2	0,5 ... 1,2	—	—
14		0,5 ... 2	0,8 ... 2	—	—
18		0,5 ... 2,5	0,8 ... 2,5	—	—
22		0,5 ... 3	0,8 ... 3	—	—
28		0,5 ... 3	0,8 ... 3	1,2 ... 3	1,2 ... 3
	30	0,8 ... 4	0,8 ... 6	1,2 ... 6	1,2 ... 6
36		0,8 ... 4	0,8 ... 8	1,6 ... 8	1,6 ... 8
	38	0,8 ... 4	0,8 ... 8	2 ... 8	2 ... 8
45		1 ... 5	—	2,5 ... 8	2,5 ... 8
56		1,2 ... 5	1,2 ... 8	3 ... 8	3 ... 8
70		1,6 ... 6	1,6 ... 8	4 ... 8	5 ... 8
90		2 ... 8	2 ... 8	5 ... 8	5 ... 8
110		3 ... 10	—	5 ... 12	5 ... 10
140		3 ... 12	—	4 ... 12	4 ... 10
180		4 ... 12	—	4 ... 12	4 ... 10
220		5 ... 12	—	5 ... 12	5 ... 10

POLUPROIZVODI OD BAKRA I BAKRENIH SLITINA

Bakrene šipke, lim i žica

Okrugle šipke, vučene (JUS C.D3.520 – 1982)

Promjer mm	Dulj. masa kg/m	Promjer mm	Dulj. masa kg/m	Promjer mm	Dulj. masa kg/m
0,5	0,00175	4,5	0,141	22	3,38
0,6	0,00252	5	0,175	25	4,37
0,8	0,00447	5,5	0,211	28	5,48
1,0	0,00699	6	0,252	32	7,16
1,2	0,0101	6,5	0,295	36	9,06
1,4	0,0137	7	0,342	40	11,2
1,6	0,0175	8	0,447	45	14,1
1,8	0,0226	9	0,566	50	17,5
2,0	0,0279	10	0,699	56	21,9
2,2	0,0338	11	0,846	60	25,2
2,5	0,0437	12	1,01	63	27,7
2,8	0,0548	14	1,37	70	34,2
3	0,0629	16	1,79	75	39,3
3,5	0,0856	18	2,26	80	44,7
4	0,112	20	2,79		

Kvadratne šipke, vučene (JUS C.D3.525 – 1972) debljina: 2...60 mm

Šesterokutne šipke, vučene (JUS C.D3.527 – 1972)
otvor ključa: 3...60 mm

Plosnate šipke, vučene (JUS C.D3.523 – 1982)
debljina: 2...40 mm, širina: 4...200 mm

Limovi, hladno valjani (JUS C.D4.520 – 1972)

Debljina mm	Plošt. masa kg/m²	Debljina mm	Plošt. masa kg/m²	Debljina mm	Plošt. masa kg/m²
0,20	1,89	0,70	5,91	2,0	16,9
0,25	2,11	0,80	6,75	2,5	21,1
0,30	2,53	0,90	7,60	3,0	25,4
0,35	2,96	1,0	8,45	3,5	29,6
0,40	3,38	1,1	9,30	4,0	34,8
0,45	3,80	1,2	10,1	4,5	38,0
0,50	4,23	1,5	12,7	5,0	42,3
0,60	5,06	1,8	15,2		

Širina: 1000 mm, duljina: 20000 mm.

Tanki limovi, hladno valjani (JUS C.D4.521 – 1972)

Žica, vučena (JUS C.D6.520 — 1972)

Debljina mm	Dulj. masa kg/km	Debljina mm	Dulj. masa kg/km	Debljina mm	Dulj. masa kg/km
Okrugla žica					
0,02	0,002 8	0,45	1,42	3,5	85,6
0,05	0,017 5	0,50	1,75	4,0	112
0,06	0,025 1	0,56	2,19	4,5	142
0,07	0,034 2	0,60	2,52	5,0	175
0,08	0,044 7	0,70	3,42	5,5	211
0,09	0,056 6	0,80	4,47	6,0	252
0,10	0,068 9	0,90	5,66	6,5	295
0,12	0,101	1,0	6,99	7,0	342
0,14	0,137	1,2	10,1	8	447
0,16	0,179	1,4	13,7	9	566
0,18	0,226	1,6	17,9	10	699
0,20	0,280	1,8	22,6	11	846
0,22	0,330	2,0	28,0	12	1010
0,25	0,437	2,2	33,8	14	1370
0,28	0,548	2,5	43,7	16	1790
0,30	0,629	2,8	54,8	18	2265
0,36	0,906	3,0	62,9		
0,40	1,12	3,2	71,6		
Kvadratna žica					
3,0	80,1	6	320	12	1282
3,5	109	7	436	13	1504
4,0	142	8	570	14	1744
4,5	180	9	721	16	2278
5,0	222	10	890	17	2572
5,5	269	11	1077		
Šesterokutna žica					
3,0	69,4	6	277	12	1120
3,5	94,4	7	378	13	1303
4,0	123	8	493	14	1510
4,5	156	9	624	17	2238
5,0	193	10	771		
5,5	233	11	933		

Bakrena užad (za električne vodiče)

Konstrukcija užeta: broj žica × promjer žice mm	Vanjski promjer užeta mm	Ukupni presjek žica mm²	Dulj. masa kg/km	Omski otpor (20 °C) Ω/km
7 × 1,70	5,10	16	143	1,11
7 × 2,10	6,30	25	222	0,715
7 × 2,5	7,50	35	311	0,51
7 × 3,0	9,00	50	443	0,36
19 × 2,1	10,50	70	620	0,26
19 × 2,5	12,50	95	844	0,19
19 × 2,8	14,00	120	1064	0,15
(19 + 18) × 2,25	16,50	150	1340	0,12

Bakrene cijevi, vučene

(JUS C.D5.500 — 1972, 501 — 1973)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)* pri debljini stijenke (mm) 0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
4	0,05	0,07	0,08	—	—	—	—	—	—
5	0,06	0,09	0,11	—	—	—	—	—	—
6	0,08	0,11	0,14	—	—	—	—	—	—
7	0,09	0,13	0,17	—	—	—	—	—	—
8	0,10	0,15	0,20	0,27	—	—	—	—	—
9	0,12	0,17	0,22	0,31	—	—	—	—	—
10	0,13	0,19	0,25	0 36	0,45	—	—	—	—
12	0,16	0,24	0,31	0,44	0,56	—	—	—	—
14	0,19	0,28	0,36	0,52	0,67	—	—	—	—
15	0,20	0,30	0,39	0,57	0,73	0,87	—	—	—
16	0,22	0,32	0,42	0,61	0,78	0,94	—	—	—
18	0,24	0,36	0,48	0,69	0,89	1,08	1,26	—	—
20	—	0,40	0,53	0,78	1,01	1,22	1,43	1,79	—
22	—	—	0,59	0,86	1,12	1,36	1,59	—	—
24	—	—	0,64	—	1,23	—	—	—	—
25	—	—	0,67	0,99	1,29	1,57	1,85	2,35	2,80
28	—	—	0,75	1,11	1,45	1,78	2,10	2,68	—
30	—	—	0,81	1,20	1,57	1,92	2,26	2,91	3,50
32	—	—	0,87	1,28	1,68	—	—	—	—
35	—	—	0,95	1,40	1,85	2,27	2,68	—	—
38	—	—	1,03	1,53	2,01	2,48	2,94	3,80	—
40	—	—	1,09	1,61	2,12	2,62	3,10	—	4,89
42	—	—	1,15	1,70	2,24	2,76	3,27	4,25	5,17
44,5	—	—	—	—	—	2,94	3,48	4,53	5,52
45	—	—	—	1,82	2,40	2,97	3,52	—	5,59
48	—	—	—	1,95	2,57	—	3,77	4,92	—
50	—	—	1,37	2,03	2,68	3,32	3,94	—	6,29

* Vidi primjedbu na str. 465!

Bakrene cijevi, vučene (nastavak)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)* pri debljini stijenke (mm) 1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
54	2,20	2,91	—	—	—	—
55	—	—	3,67	—	—	—
56	—	—	—	4,45	—	—
57	—	—	3,81	4,53	5,93	7,27
58	—	—	—	—	6,04	7,41
60	—	3,24	4,02	4,78	6,26	7,69
64	2,62	3,47	—	—	—	—
65	—	—	4,37	—	—	—
66	—	—	—	5,28	—	—
70	—	3,80	4,72	—	—	9,09
74	—	4,03	—	—	—	—
75	—	—	5,07	—	—	—
76	—	—	5,14	6,12	8,05	9,93
80	—	—	5,42	—	8,50	10,5
84	—	4,59	—	—	—	—
85	—	4,64	5,77	—	—	—
86	—	—	—	6,96	—	—
89	—	—	6,05	7,21	9,51	11,7
100	—	5,48	—	8,14	—	—
105	—	—	7.16	—	—	—
106	—	—	—	8,64	—	—
108	—	—	—	8,81	11,6	14,4
114	—	—	—	9,31	12,3	—
120	—	—	8,21	—	—	16,1
130	—	—	—	—	—	17,5
133	—	—	—	10,9	14,4	—
150	—	—	—	—	—	20,3
159	—	—	—	—	17,3	21,5
170	—	—	—	—	18,6	23,1
190	—	—	—	—	—	25,9
194	—	—	—	—	21,2	—
200	—	—	—	—	—	27,3
219	—	—	—	—	24,0	—
267	—	—	—	—	29,4	—
273	—	—	—	—	30,1	—
324	—	—	—	—	35,8	—
368	—	—	—	—	40,7	—
419	—	—	—	—	46,4	—

* Standardizirane su one cijevi, za koje je u tablici navedena duljinska masa.

Cijevi od bakrenih slitina, vučene
(JUS C.D5.520 — 1972, 522 — 1973)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)* pri debljini stijenke (mm)								
	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
4	0,05	0,07	0,08	—	—	—	—	—	—
5	0,06	0,09	0,11	—	—	—	—	—	—
6	0,08	0,11	0,14	—	—	—	—	—	—
7	—	—	0,17	—	—	—	—	—	—
8	0,10	0,15	0,20	0,27	0,34	—	—	—	—
9	—	—	0,22	—	—	—	—	—	—
10	0,13	0,19	0,25	0,36	0,45	0,52	0,59	—	—
12	0,16	0,24	0,31	0,44	0,56	0,66	0,75	0,89	—
14	0,19	0,28	0,36	0,52	0,67	0,80	0,92	1,12	—
15	0,20	0,30	0,39	0,57	0,73	0,87	1,01	1,23	—
16	0,22	0,32	0,42	0,61	0,78	0,94	1,09	1,34	—
18	0,24	0,36	0,48	0,69	0,89	—	1,26	1,57	1,82
20	0,27	0,40	0,53	0,78	1,01	1,22	1,43	1,79	2,10
22	—	0,45	0,59	0,86	1,12	—	1,59	2,01	2,38
25	—	0,51	0,67	0,99	1,29	1,57	1,85	2,35	2,80
28	—	—	0,75	1,11	1,45	1,78	2,10	2,68	3,22
30	—	—	0,81	1,20	1,57	1,92	2,26	2,91	3,50
32	—	—	0,87	1,28	1,68	—	—	—	—
35	—	—	0,95	1,40	1,85	2,27	2,68	3,47	4,19
38	—	—	1,03	1,53	2,01	2,48	2,94	3,80	4,61
40	—	—	1,09	1,61	2,12	2,62	3,10	4,03	4,89
42	—	—	1,15	1,70	2,24	2,76	3,27	—	—
44,5	—	—	—	1,80	2,38	2,94	3,48	—	—
45	—	—	—	1,82	2,40	2,97	3,52	—	—
48	—	—	—	1,95	2,57	—	—	4,92	—
50	—	—	1,37	2,03	2,68	3,32	3,94	5,14	6,29
55	—	—	—	—	—	3,67	4,36	—	6,99
56	—	—	—	—	—	—	4,45	—	—
57	—	—	—	2,33	3,08	3,81	4,53	—	—
58	—	—	—	—	—	—	—	6,04	—
60	—	—	—	2,45	3,24	4,02	4,78	6,26	7,69
64	—	—	—	—	3,47	—	—	—	—
65	—	—	—	—	—	4,37	—	—	—
66	—	—	—	—	—	—	5,28	—	—
70	—	—	—	2,87	3,80	4,72	5,62	7,38	9,09

* Vidi primjedbu na str. 467!

Cijevi od bakrenih slitina, vučene (nastavak)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)* pri debljini stijenke (mm)					
	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
75	—	5,07	—	—	—	—
76	4,14	5,14	6,12	—	—	—
80	—	5,42	6,46	8,50	10,5	—
85	4,64	5,77	—	—	11,2	—
86	—	—	6,96	—	—	—
89	4,87	6,05	7,21	—	—	—
100	5,48	—	8,14	10,7	13,3	—
104	5,70	—	—	—	—	—
105	—	7,16	—	—	—	—
106	—	—	8,64	—	—	—
108	—	7,37	8,81	11,6	—	—
114	—	7,79	9,31	—	—	—
120	—	8,21	—	—	16,1	—
125	—	8,56	—	13,5	16,8	—
130	—	—	—	—	17,5	—
133	—	9,12	10,9	14,4	17,9	—
150	—	—	—	—	20,3	—
159	—	10,9	13,1	17,3	21,5	—
160	—	—	—	17,5	—	—
168	—	11,6	13,8	18,3	—	—
170	—	—	—	—	23,1	—
190	—	—	—	—	25,9	—
194	—	13,4	16,0	—	—	—
200	—	—	—	21,9	27,3	—
219	—	—	18,1	24,0	29,9	—
267	—	—	22,1	29,4	36,6	—
273	—	—	22,6	30,1	37,5	—
324	—	—	—	35,8	44,6	53,3
368	—	—	—	40,7	50,7	60,7
419	—	—	—	46,4	57,9	69,3

* Standardizirane su one cijevi za koje je u tablici navedena duljinska masa. – Masa je proračunana za gustoću od 8 900 kg/m³. Pri gustoći slitine ρ kg/m³ valja vrijednosti tablice pomnožiti s faktorom ρ/8 900.

Cijevi za kondenzatore i izmjenjivače topline – JUS C.D5.521 – 1981.

POLUPROIZVODI OD MJEDI, CINKA I OLOVA

Mjedni poluproizvodi

Mjedne šipke, istiskane

Okrugle šipke (JUS C.D3.522 – 1982)
Plosnate šipke (JUS C.D3.524 – 1956)
Kvadratne šipke (JUS C.D3.526 – 1956)
Šesterokutne šipke (JUS C.D3.528 – 1956)

Mjedeni kutni profili

jednakokračni, prešani (JUS C.D3.529 – 1956)
duljine krakova 10 × 10... 60 × 60 mm
raznokračni, prešani (JUS C.D3.530/531 – 1956)
duljine krakova 10 × 20... 25 × 50, 15 × 20... 30×45 mm

Mjedena žica (okrugla)

prešana (JUS C.D6.521 – 1956), promjeri 5... 15 mm

Cinčani poluproizvodi

Pri određivanju mase poluproizvoda od cinka računamo s gustoćom od 7180 kg/m³.

Cinčani lim (JUS C.E4.020 – 1970)

debljina lima 0,2... 6 mm
veličina ploče 1000 × 2000 (3000) mm

Olovni poluproizvodi

Pri određivanju mase poluproizvoda od olova računamo s gustoćom od 11400 kg/m³.

Olovni lim (JUS C.E4.030 – 1963)

debljina lima	1... 4 mm
širina	1000 mm
duljina	do 10000 mm

Olovne cijevi

– *dovodne cijevi* (JUS C.E4.040 – 1963)
unutarnji promjeri 10... 26 mm
debljina stijenki 2,0... 7 mm
– *odvodne cijevi* (JUS C.E4.041 – 1963)
unutarnji promjeri 30... 125 mm
debljina stijenki 2,0... 2,5 mm

Olovna žica (JUS C.E6.050 – 1965)

promjeri 2... 20 mm

NEKOVINSKI MATERIJALI

ANORGANSKI NEKOVINSKI MATERIJALI

Staklo

Staklo se sastoji od natrijskih i kalcijskih (te kalijskih i bornih) silikata. Posebna mu svojstva daju dodaci oksida nekih kovina (Pb, Mg, Al, Zn, Te).

Staklo je amorfno (nema kristalne strukture) i zato bez određenog tališta prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Pri temperaturi 1300 do 1500 °C može biti tekuća talina (lijevanje!), pri temperaturi 1000 °C je gusta tekućina prikladna za preradu (puhanjem, vučenjem, valjanjem, prešanjem). Temperatura smekšavanja (prelaza u krutinu) je oko 500 °C. Kremično staklo – SiO_2 – smekšava se pri 1200 °C.)

Pri temperaturi okoliša je staklo u amorfnom stanju pothlađene tekućine. Njegova je tlačna čvrstoća 400... 1300 N/mm², vlačna čvrstoća iznosi 30... 90 N/mm².

Najznačajnija su svojstva stakla: propustivost za svjetlo (85... 90%), kemijska otpornost na zrak, vodu i kiseline (osim fluorovodične HF) i neprovodnost za električnu struju.

Upotreba: natrijsko staklo – za armature manjih zahtjeva; borno – za aparate s većim zahtjevima; kremično – za dijelove kod viših temperatura.

Brzim ohlađivanjem vruće staklene ploče javljaju se na površini tlačna naprezanja koje povečavaju čvrstoću na savijanje. Takvo se staklo pri lomu raspada na prašinu. Staklene ploče, s obih strana obljepljene folijom od prozirne plastike, upotrebljava se kao sigurnosno staklo (npr. za automobile).

Beton

Cementni beton je umjetni kamen od cementa, betonskih dodataka (pijeska i šljunka) i vode, a nastaje skrućivanjem cementnog veziva (mješavine cementa s vodom).

Portland cement se sastoji od 1 dijela $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ i najmanje 1,7 dijela CaO.

Volumenski omjer mješavine cement : pijesak	Tlačna čvrstoća betona* N/mm²	Volumenski omjer mješavine cement : pijesak : šljunak	Tlačna čvrstoća betona* N/mm²
1 : 4	22... 30	1 : 2 : 3	22... 25
1 : 5	18... 22	1 : 3 : 5	13... 18
1 : 8	9... 12	1 : 4 : 6	10... 12

* Nakon 28 dana.

Zbog male vlačne čvrstoće (u odnosu na tlačnu) ojačavaju se vlačna područja u betonu čeličnim uloščima (armirani beton). Ako su čelični ulošci prednapregnuti, izazivaju u neopterećenom stanju u betonu tlačna naprezanja radi kojih je moguće, da se pri opterećenju uopće ne pojavljuju vlačna naprezanja (prednapregnuti beton).

Pjenasti beton

Normalni (teški) beton gustoće 2200 ... 2600 kg/m^3 provodi toplinu razmjerno dobro. Lakim dodacima (npr. mljevenom drvenom piljevinom, drvenom vunom i sl.) te odgovarajućom obradom stvaraju se u betonu pore (zrak) koje veoma snizuju njegovu gustoću (na 300 ... 500 kg/m^3) pa mu zbog velikog smanjenja tlačne čvrstoće smanjuju nosivost, ali mu veoma povećavaju izolacijsku sposobnost.

Polimerni beton

Polimarni beton je umjetni kamen pri kojemu umjesto cementa upotrebljavamo kao vezivo razna ljepila na bazi plasitke (MMA, UP).

Polimerni beton (s 5 ... 15% veziva) postizava nakon jednog dana slijedeća mehanička svojstva:
tlačnu čvrstost 70 ... 150 N/mm^2, modul elastičnosti 15 000 ... 30 000 N/m^2, čvrstoću na savijanje 20 ... 40 N/mm^2, temper. rastezljiv. (15 ... 20) $10^{-6}\,K^{-1}$.

Upotrebljava se za temelje strojeva i konstrukcija, mjerne ploče. I polimerni beton može biti pjenast.

Keramički materijali

Keramičke tvari sadrže većinom okside. Svi čisti oksidi su kemijski vrlo postojani i imaju visoka tališta:

Al_2O_3:	2046 °C	BeO:	2530 °C
SiO_2:	1702 °C	ZrO_2:	2700 °C

Sinterovani korund Al_2O_3 odlikuje se velikom tvrdoćom 3800 HV 30 i velikom tlačnom čvrstoćom. (Dodatkom Cr_2O_3 čistom Al_2O_3 nastaje sinterovani rubin tvrdoće 4000 HV 30.)

Sinterovani korund upotrebljava se za izradu dijelova koji moraju biti posebno otporni na habanje (matrice za vučenje žice, dijelovi tekstilnih strojeva) i postojani u visokoj temperaturi (svjećice motora s unut. sagor. i sl.).

Tvrdoća, koja se ni pri visokim temperaturama (do 1200°) bitno ne smanjuje te mala toplinska provodnost su svojstva sinterovanoga korunda koja su naročito značajna za izradu alata za rezanje (tokarenje, glodanje) i brušenje.

Sastavljeni keramički materijal $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ je veoma otporan na habanje (upotreba npr. pri dodirnim plohama mjerila). Materijal $MgO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (kao i $MgO \cdot SiO_2$) vrlo je otporan na temperaturne promjene.

Od kvalitetne gline koja – osim Al_2O_3 – sadrži i SiO_2 te alkalne okside (kao i posebne dodatke) izrađen keramički materijal (kamenština) ima vlačnu čvrstoću 6,5 ... 13 N/mm^2, tlačnu čvrstoću 320 ... 350 N/mm^2. Zbog velike otpornosti prema kiselinama upotrebljava se u kemijskoj industriji za aparate i strojne dijelove (za pumpe, ventilatore, mješalice i sl.).

Opeka

Opeka je pri temperaturi 900 ... 1300°C pečena glina (prven. Al_2O_3).
Tlačna čvrstoća opeka iznosi (po kvaliteti) 10 ... 25(... 35) N/mm^2.
Normalni je format opeke: 240 × 115 × 71 mm.

Vatrostalni keramički materijali

Talište mora biti najmanje 1580 °C. Za kvalitetu su odlučni još: temperatura na kojoj se materijal pod tlakom smekšava; propustljivost za plinove; otpornost prema temperaturnim promjenama i prema kemijskim utjecajima.

Vatrostalne keramičke materijale dijelimo na:

a) *kisele* — glavna sastavina: kremen (SiO_2),
b) *bazične* — glavna sastavina: dolomitna ($CaO \cdot MgO$) ili magnezitna (MgO),
c) *neutralne* — glavna sastavina: glina, kaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), glinica (Al_2O_3), kromit (Cr_2O_3) ili ugljen (C).

Naziv	Sastav %	Talište °C	Otpornost prema tlaku do °C	Upotreba
silika I	> 94,5 SiO_2 < 2 Al_2O_3 < 3,5 CaO	1720	1630	teško opterećeni dijelovi pri visokim temperaturama, velika osjetljivost prema bazičnoj troski
silika II	> 92 SiO_2	1670	1560	
kremeni šamot (polukiseli)	≈ 90 SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + Fe_2O_3	1650	1470	srednje opterećeni dijelovi
šamot (bazični)	55 ... 60 SiO_2 36 ... 41 Al_2O_3 0,2 ... 0,6 CaO 0,8 ... 0,2 Fe_2O_3	>1580	1300	manje opterećeni dijelovi ložišta (dimni kanali)
silimanit	55 ... 60 Al_2O_3 ost. SiO_2	≈ 1875	1620	otporan prema troski i temperaturnim promjenama
magnezit	85 ... 88 MgO 4 ... 6 SiO_2 1 ... 2 CaO 1 ... 2 Al_2O_3 4 ... 5 Fe_2O_3	>2000	1400	za peći s bazičnom oblogom, velika osjetljivost prema temperaturnim promjenama
kromni magnezit	> 42 MgO > 15 Cr_2O_3	≈ 1960	1560	otporan prema visokim temperaturama, brzim temperaturnim promjenama i utjecaju troske
karborund	45 ... 80 SiC 10 ... 25 SiO_2 9 ... 20 Al_2O_3 + Fe_2O_3	>2000	1700	neosjetljiv prema temperaturnim promjenama; iznad 1600 °C raspada zbog oksidirajućih plinova
ugljen	85 ... 90 C	>2000	1750	lonci, peći, elektrode

DRVO

Drvo se odlikuje malom gustoćom, razmjerno velikom čvrstoćom i lakom obradom.

Drvo upotrebljavamo kao gradivo (u građevinarstvu, brodogradnji, za vozila, u tekstilnoj industriji itd.) ili kao sirovinu (za izradu papira i celuloze).

Vrsta drveta	Gustoća kg/m³	Smjer s obzir. vlakna	Čvrstoća N/mm²			
			vlačna	tlačna	na savij.	smična
brijest	500...850	∥	60...210	30...60	50...160	7
		⊥	4	10	–	25
bukva	500...900	∥	60...180	40...80	60...180	5...20
		⊥	7	10	–	35
grab	500...850	∥	50...200	40...80	50...140	10
		⊥	6	10	–	30
jasen	500...900	∥	30...220	30...60	50...180	7
		⊥	7	10	–	–
hrast	400...950	∥	50...180	40...60	70...100	5...15
		⊥	5	10	–	30
orah	600...750	∥	100	40...70	80...140	–
		⊥	4	10	–	–
bor	300...900	∥	40...190	30...80	40...200	5...15
		⊥	3	10	90	20
jela	300...700	∥	50...120	30...50	40...100	5
		⊥	2	4	–	25
smreka	300...700	∥	40...240	30...70	40...120	5...10
		⊥	3	5...10	–	25

Na zraku sušeno drvo ima oko (10)12...15(20) postotaka vlage. Povećanjem vlage čvrstoća se osjetno smanjuje.

Oplemenjeno drvo

Svojstva drveta možemo poboljšati rezanjem na tanke ploče – furnire – i njihovim slepljivanjem.

Ukočeno drvo su slijepljeni furniri i to:

- kao lamelirani nosači s jednosmjernim vlaknima (dobra čvrstoća u smjeru vlakana),
- kao vezane ploče s vlaknima pod kutom 45 ili 90° (u svim smjerovima jednolika čvrstoća).

Stolarske ploče (panel-ploče) imaju u unutrašnjosti slijepljene letve, pokrivene s obiju strana furnirom.

Vlaknatice (lesonit) su (razmjerno tanke) ploče, izrađene valjanjem drvene kaše od piljevine i ljepila.

Iverice su (razmjerno deblje) ploče, izrađene valjanjem drvene kaše, obljepljene obostrano furnirom.

Oplemenjene drvene ploče su čvršće i praktički se ne savijaju.

PLASTIČNE MASE

Plastične mase (plastika) su umjetne tvari čija su glavna sastojina polimeri (str. 96). S obzirom na karakteristična svojstva razvrstavamo ih u slijedeće glavne skupine:

1. Termoplasti

Termoplasti su umjetne tvari od polimera koje imaju međusobno fizikalno vezane makromolekule. Po stanju su više ili manje viskozne tekućine. Mogu biti amorfne ili djelomično kristalinične. Pri temperaturi okoliša su tvrdi, a pri zagrijavanju se smekšavaju (povratno). Lako se mogu preoblikovati i zavarivati. Redovno su topivi u posebnim organskim otapalima. Njihovi se otpaci lako regeneriraju i ponovno upotrebljavaju. Ovamo se ubrajaju npr.:

amorfni termoplasti (koji se skrućuju odnosno smekšavaju do taline kontinuirano u širokom temperaturnom području)

PVC – polivinilklorid
PMMA – polimetilmetakrilat
PS – polistiren (polistirol)
PC – polikarbonat
ABS – akrilnitril butadienstiren
CN – celuloid

djelomično kristalinični termoplasti (koji se skrućuju iz taline u uskom temperaturnom području – »talištu«)

PE – polietilen
PTFE – politetrafluoretilen
PP – polipropilen
PA – poliamid
SAN – stirenakrilnitril
PETP – polietilentereftalat (poliester)
POM – polioksimetilen

2. Elasti

Elasti su umjetne tvari od polimera, koje imaju međusobno labavo vezane makromolekule. Dobivamo ih iz termoplasta vulkanizacijom (tj. kemijskim postupkom omrežívanja). Uvijek su amorfni. Pri temperaturi okoliša su meko gumeno elastični. Već i najmanja naprezanja izazivaju velika elastična produljenja. Ovamo ubrajamo npr.:

NR – prirodni kaučuk
IIR – butilni kaučuk
PUR – poliuretanski kaučuk
NBR – akrilnitrilbutadienski kaučuk
SBR – stirenbutadienski kaučuk
BR – butadienski kaučuk
SI – silikonski kaučuk

3. Duroplasti

Duroplasti su umjetne tvari od polimera koje imaju kemijski mrežom vezane makromolekule (nepovratni proces). Uvijek su amorfni. Oblikuju se (i učvršćuju) preko taline, a preoblikovanje je omeđeno. Teško se tope i zavaruju. Njihovi otpaci nisu upotrebljivi (ili samo kao dodatak). Ovamo spadaju npr.:

PF – fenolna smola (fenoplast)
UP – poliesterska smola
UF – uratna smola (aminoplast)
EP – epoksidna smola
MF – melaminska smola
PUR – poliuretanska smola

S obzirom na broj polimera te dodatak još i drugih organskih ili anorganskih tvari dijelimo plaste na slijedeće skupine:

1. *Homogeni plasti* sastoje se iz samo jednog polimera. Mogu biti u amorfnom, kristaliničnom ili (kristalno) miješanom stanju. Udio kristalne tvari u cjelokupnoj tvari (mješavini amorfne i kristalinične tvari) određuje »stupanj kristalizacije« od koje ovise svojstva tvari.

2. *Heterogeni plasti* sastoje se od polimera i još jedne ili više kemijski različitih tvari koje su s polimerom vezane kemijski ili fizikalno. Ovamo se ubrajaju i međusobno miješani polimeri.

3. *Ukrućeni plasti* sastoje se od polimera i još jedne ili više kemijski različnih tvari koje mogu biti organske ili anorganske te se većim dijelom osjetno razlikuju od polimera. Tvari su međusobno vezane fizikalno (rijetko kemijski). To su p u n i l i m a ukrućeni plasti.

Kao punila koja se dodaju u tekućim plastima dolaze u obzir u prvom redu:

staklena vuna i predivo
kameno brašno
tinjac
azbestna vlakna i vrpce
drveno brašno
celuloza
pamučna vlakna i tkanine
umjetna svila.

Svim vrstama plasta mogu se dodati svakakvi dodaci, npr. boje.
S obzirom na izbor jednog ili više međusobno miješanih polimera, kojima možemo dodati brojne druge tvari, dobivaju se plasti veoma raznovrsnih svojstava, prilagođenih zahtjevima upotrebe.

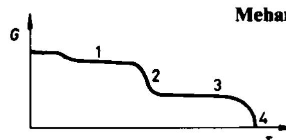
Plasti se (pre)oblikuju raznim tehnološkim postupcima (lijevanjem, prešanjem, istiskavanjem, zavarivanjem, ispuhivanjem, izvlačenjem, predenjem itd.) u:

- poluproizvode (cijevi, ploče, folije),
- dijelove strojeva i aparata (kućišta, strojni elementi),
- pjene, tvrde i meke (ulošci za blazine pokućstva, spužve za čišćenje, podne obloge),
- vlakna (za predivo u tekstilnoj industriji)

ili se upotrebljavaju kao pomoćna sredstva:

- lakove (za zaštitne i/ili ukrasne predmete),
- ljepila (za keramiku, kovine, drvo, papir).

Mehanička stanja plasta



Mehanička stanja plasta su ovisna o temperaturi. Ovu ovisnost pregledno prikazuje dijagram modula smika G pri raznim temperaturama T.

U dijagramu se razabiru slijedeća područja stanja:

– *Tvrdoelastično područje* (1) obuhvaća niske temperature. U tom su području plasti (umjetne tvari) tvrdi i krhki pa je za njih karakteristična ograničena elastična deformacija velikog modula elastičnosti ($E = 200\ldots4000\,N/mm^2$), koji pada s povišenjem temperature.

Stoga uzevši kod plasta ne postoji čista elastična deformacija, jer se dodatno uvijek javlja – u ovisnosti o vremenu, temperaturi i opterećenju – i visokoelastičan udio preoblikovanja.

Modul smika se u tom području malo mijenja s temperaturom ($G = 10^2\ldots10^4\ N/mm^2$).

– *Područje smekšavanja* (2) obuhvaća temperature pri kojima je već omogućeno pomicanje molekula (koje u tvrdoelastičnom području – kad su molekule još »smrznute« – nije bilo moguće).
U području smekšavanja prelaze plasti iz krhkoga u žilavo stanje.

– *Gumielastično područje* (3) rasprostire se od područja smekšavanja do taljenja plasta. Za to je područje karakteristična vrlo velika elastična deformacija uz mali modul elastičnosti ($E = 2\ldots600\,N/mm^2$).

Modul smika je u tom području neznatno ovisan o temperaturi ($G = 0{,}1\ldots100\ N/mm^2$).

Smekšavanje i gumielasitčno područje se javljaju samo pri amorfnim tvarima. Pri kristalnim tvarima, tvrdoelastično stanje seže sve do područja taljenja; pri djelomično kristalnim tvarima, smekšavanje i gumielastično područje su ovisni o stupnju kristalizacije.

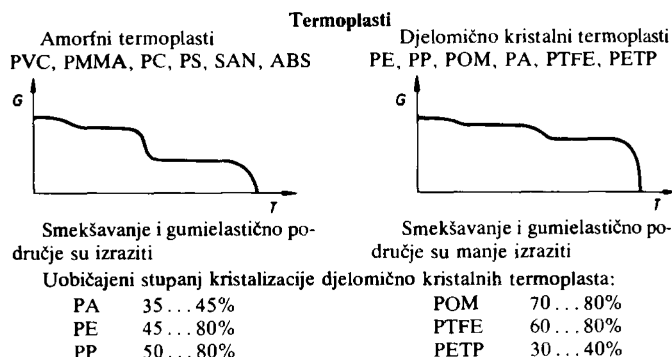
– *Područje taljenja* (4) se pri amorfnim tvarima izražava postupnim prijelazom tvari iz gumielastičnog stanja kroz plastično stanje (s izrazitim tečenjem tvari) do potpunog taljenja. Pri djelomično kristalnim tvarima se taljenje zbiva u užem temperaturnom području, a još izrazitije je talište pri kristalnim tvarima.

*

Termoplasti

Amorfni termoplasti
PVC, PMMA, PC, PS, SAN, ABS

Djelomično kristalni termoplasti
PE, PP, POM, PA, PTFE, PETP



Smekšavanje i gumielastično područje su izraziti

Smekšavanje i gumielastično područje su manje izraziti

Uobičajeni stupanj kristalizacije djelomično kristalnih termoplasta:

PA	35...45%	POM	70...80%
PE	45...80%	PTFE	60...80%
PP	50...80%	PETP	30...40%

Mehanička svojstva termoplasta

Termoplast	Oznaka	Modul elast. kN/mm²	Čvrstoća vlačna N/mm²	Čvrstoća na savij. N/mm²	Zarezna žilavost kJ/m²	Tvrdoća (kugl.) N/mm²
polietilen	PE – HD	0,7...1,4	18...35	36	–	40...65
	PE – LD	0,2...0,5	8 ..23	–	–	13...20
polipropilen	PP	1,1...1,3	21...37	43	3...17	36...37
polivinilklorid	PVC tvrdi	1,0...3,5	50...75	110	2...50	75...155
	PVC meki	–	10...25*	–	–	–
polistiren	PS	3,2...3,3	45...65	90	2...3	120...130
stirenakril-nitril	SAN	3,6	70...85	100	2...3	130...140
akrilnitril-butadienstiren	ABS	1,9...2,7	32...45	75	7...20	80...120
polimetil-metakrilat	PMMA	2,7...3,2	50...77	105	2...6	180...200
polioksi-metilen	POM	2,8...3,2	62...70	110	3...9	150...170
politetra-fluoretilen	PTFE	0,41	25...36	18	13...15	27...35
poliamid	PA 6	1,4	70...85	27	8...16	75
	PA 66	2,0	77 ..84	50	15...20	100
	PA 11	1,0	56	–	30...40	75
	PA 12	1,6	56...65	–	10...20	75
polikarbonat	PC	2,1...2,4	56...67	100	20...30	110
polietilen-tereftalat	PETP	2,4	39	80	4...5	–
celulozni acetat	CA	2,2	28**	44	15	50
celul. acetbutirat	CAB	1,6	26**	38	30...35	35...43

* Postotno produljenje > 400%. – ** Naprezanje tečenja $R_{p\,0,2}$.

Toplinska svojstva i upotreba termoplasta

Oznaka	Ispit. po Vicatu °C	Područje tališta °C	Temper. rastez. $10^{-4}\ K^{-1}$	Topl. vodljiv. W/(m. K)	Upotreba
PE – HD	70...75	125...135	2	0,50	Cijevi, profili, ploče, folije, pjene, vlakna. Prešani dijelovi otporni na vodu, lužine, blage kiseline.
PE – LD	< 40	110...150	2,5	0,35	
PP	95	157...170	1,6	0,22	
PVC tvrdi	70...90		0,8	0,16	Cijevi, profili, folije, pjene. Dijelovi kem. apar. (pumpe).
PVC meki	40...60		1,5	0,13	
PS	86.. 91		0,7	0,17	Kućišta i dijelovi kućnih aparata, uredske tehnike, vozila (karoserije), čamaca.
SAN	100...110		0,7	0,15	
ABS	90...105		1,0	–	
PMMA	40...108		0,7	0,19	Čisti bezbojni dijelovi (pleksistaklo) ili obojeni. Habanju podlož. dijelovi. Klizni ležaji, zupčanici. Patentni zatvarači.
POM	173		0,9	0,22	
PTFE	50...60		1,6	0,24	Brtve gibljivih dijelova. Ležaji (bez maziva).
PA – 6		220	0,8	0,23	Dijelovi otporni na habanje, udarce i dinamičko opterećenje. Kućišta, klizni ležaji, zupčanici.
– 66		225...265	0,9	0,27	
– 11		–	0,9	0,23	
– 12		172...180	1,1	0,30	
PC	145...150	220...260	0,7	0,21	Ploče, folije. Providna kućišta.
PETP	80	255...258	0,8	0,24	Prozirne folije, čvrste i žilave.
CA	74...110		1,0	0,22	Cijevi, profili, ploče, folije (celofan). Češljevi, naočari, igračke. (Požarna opasnost!)
CAB	65...111		1,2	0,21	

Ukrućeni termoplasti

Ukrućivanjem termoplasta se osjetno mijenjaju njihova mehanička svojstva: gustoća se povećava, čvrstoća jako raste, rastezljivost se veoma smanjuje. U vezi s tim promjenama mijenjaju se i druga mehanička svojstva.

Primjeri mehaničkih svojstava nekih termoplasta, ukrućenih staklenim vlaknima (*sv* ≈ 30%) (zaokružene prosječne vrijednosti):

Termoplast		PP	PP + *sv*	SAN	SAN + *sv*	POM	POM + *sv*
Gustoća	kg/m³	906	1114	1080	1360	1410	1560
Čvrstoća	N/mm²	29	71	75	110	66	130
Post. produlj.	%	600	6	4	2	45	3

Termoplast		PA	PA + *sv*	PC	PC + *sv*	PETP	PETP + *sv*
Gustoća	kg/m³	1135	1400	1200	1520	1330	1690
Čvrstoća	N/mm²	75	180	65	100	39	193
Post. produlj.	%	30	3	100	3	225	2

Trajna čvrstoća termoplasta

Čvrstoća termoplasta vrlo je ovisna o trajanju opterećenja pa se s opterećenjem izrazito smanjuje.

Vremenska statička čvrstoća termoplasta

Trajanje opterećenja min	Vremenska statička čvrstoća N/mm² termoplasta			
	PE	PVC	PS	ABS
10^{-6}	60	210	90	135
10^{-3}	35	90	65	80
1	20	60	45	45
10^{3}	15	40	30	25
10^{6}	10	35	25	20
10^{9}	8	32	22	18

Naprezanja u termoplastu s vremenom popuštaju (relaksacija).

Prvotno se naprezanje uz konstantnu deformaciju smanjuje (što valja uzeti u obzir u stanovitim slučajevima, npr. pri brtvama).

Uz konstantno opterećenje deformacija raste – javlja se p u ž e n j e materijala, koje je ovisno o veličini opterećenja i njegovom trajanju (stoga treba pri projektiranju odabrati takvo opterećenje dijelova, pri kojem je – s obzirom na puženje – za određeno trajanje osigurana njihova funkcionalnost).

Trajna dinamička čvrstoća termoplasta

Termoplast	PE	SAN	PA 6	PC
Broj titraja	10^8	10^7	10^8	10^7
Trajna dinamička čvrstoća N/mm²	17	20	30	6

Vremenska dinamička čvrstoća polivinilklorida PVC

Broj titraja	10^4	10^5	10^6	10^7
Vremen. dinam. čvrst. N/mm²	28	17	10	5

Klizavost

Termoplasti posjeduju dobre klizne sposobnosti za ležaje i vodila (u kombinaciji kovine i umjetne tvari). Mana je u maloj toplinskoj vodljivosti termoplasta, a time je i smanjena sposobnost odvođenja topline trenja.

Umjetna tvar	Koeficijent trenja bez podmazivanja	s podmazivanjem	Dozvoljeni pritisak N/mm²
PE	0,18 . . . 0,25	0,04 . . . 0,07	10
PA	0,08 . . . 0,25	0,01 . . . 0,08	19
PA z MoS_2	0,03 . . . 0,14	0,01 . . . 0,03	20

Ovisnost vlačne čvrstoće termoplasta o temperaturi

Termoplast	Vlačna čvrstoća N/mm² pri temperaturi °C								
	−50	−25	0	25	50	75	100	125	150
PE	59	49	39	30	20	14	10	8	
PVC		88	75	59	38				
PS	83	76	69	62	49	34			
PC	88	80	72	64	58	52	40	27	12

Temperaturna upotrebljivost umjetne tvari (u °C)

PE	−100 . . . 85	POM	−100 . . . 100
PP	− 30 . . . 110	PTFE	−100 . . . 165
PVC	− 45 . . . 80	PA	−100 . . . 145
PS	−100 . . . 80	PC	−100 . . . 120
PMMA	−100 . . . 70	PETP	−100 . . . 100

Kemijska postojanost termoplasta

Termoplast	Otpornost* prema vodi	slanoj otop.	kiselinama	bazama	oksidaciji	rastapalima
PE	+	+	+	+	(−)	(+)
PP	+	+	+	+	−	(+)
PVC	+	+	(+)	(+)	(−)	−
PS	+	+	+	+	(−)	−
SAN	+	+	o	+	−	−
ABS	+	+	o	+	−	−
PMMA	o	+	o	o	(−)	−
POM	+	+	−	o	−	(o)
PTFE	+	+	+	+	+**	+
PA	o	o	−	o	−	(o)
PC	+	+	(−)	−	−	(−)
PETP	+	+	o	−	−	(o)

* + – velika otpornost
o – mala otpornost
− – nedovoljna otpornost
** PTFE je negorljiv.

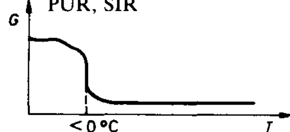
U zagradama su označena odstupanja od vrijednosti određene otpornosti.

Starenje obuhvaća sve promjene u sastavu tvari što ih izazivaju mehanička opterećenja, više temperature, zračenje, električna struja, kemijske tvari itd.

Kemijsko raspadanje termoplasta koje pospješuju uzročnici starenja mogu trajati više desetljeća.

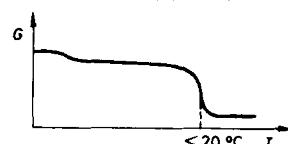
Elasti

Tipični elasti:
prirodni kaučuk s 1 . . . 10% S,
PUR, SIR



Gumielastično područje počinje već pri temperaturi pod 0 °C

Tipični termoelasti:
prirodni kaučuk s više od 10% S



Gumielastično područje počinje već pri temperaturama do 20 °C

Mehanička svojstva elasta
Modul elastičnosti $E \approx 700 \ldots 1000$ N/mm^2.

Elasti		Gustoća kg/m^3	Čvrstoća N/mm^2		Postot. produlj. %	Temperatura upotrebe °C
kaučuk	oznaka		neutvr.	utvr.		
prirodni –	NR	930	22	28	600	– 45 . . . 85
poliuretanski – (meki)	PUR	1260	20	32	450	–100 . . . 50
stiren-butadienski –	SBR	940	5	25	500	– 35 . . . 110
butadienski –	BR	940	2	18	450	– 70 . . . 100
butilni –	IIR	930	5	21	600	– 30 . . . 120
akrilnitril-butadienski –	NBR	1000	6	25	450	– 20 . . . 110
silikonski –	SIR	1250	1	10	250	–100 . . . 200

Prirodni kaučuk NR ima odlične elastične sposobnosti i vrlo dobru udarnu žilavost. Postojan je u vodi i kiselinama; manje postojan u mineralnim uljima i mazivima. (Plaštevi kotača za teretnjake, gumene opruge, ležaji, brtve.)

Poliuretanski kaučuk PUR vanredno je otporan prema habanju, dobro upotrebljiv samo do temperature 50 °C. Postojan je u mineralnim uljima, ali nepostojan u vrućoj vodi. (Valjni koluti, ležajne blazinice, brtve, amortizeri.)

Stirenbutadienski kaučuk SBR (buna) veoma je otporan prema habanju i većim temperaturnim opterećenjima; pri dinamičkom opterećenju se jako zagrijava. (Plaštevi točkova za osobna vozila, brtve, gipke cijevi, profili, trake.)

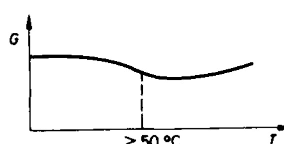
Butadienski kaučuk BR (buna CB) vrlo je otporan prema habanju pa se zato upotrebljava za vozni sloj plašteva kotača.

Butilni kaučuk IIR vrlo je otporan na vremenske uplive i starenje te vrlo malo propušta plinove. (Zračnice kotača za vozila, gibjive cijevi.)

Akrilnitrilbutadienski kaučuk NBR (perbunan) postojan je u mineralnim uljima, mastima i tekućim gorivima, ali nepostojan u kloriranim ugljikovodicima. (Gibljive cijevi za benzin, membrane.)

Silikonski kaučuk SIR je izvanredno otporan na temperaturu. Postojan je u ulju i mastima, ali neotporan prema vrućoj vodi, ugljikovodicima, lužinama i kiselinama. (Brtve prehr. uređaja, transportne trake, električne izolacije.)

Duroplasti



Duroplasti su amorfni (kristalnih područja nema).

Temperatura smekšavanja (koja nije izrazita) leži nad 50 °C.

Taljenja nema jer duroplasti prije raspadnu.

Mehanička svojstva duroplasta

Duroplasti		Gust. kg/m^3	Modul elast. N/mm^2	Čvrstoća		Zarez. žilav. kJ/m^2	Temper upotrebe °C
smola	oznaka			vlač. N/mm^2	na savij. N/mm^2		
fenolna – (fenoplast)	PF	1400	700	25	70	1,5	< 125
uratna – (aminoplast)	UF	1500	–	30	80	1,5	< 100
melaminska –	MF	1500	900	30	80	1,5	< 120
poliesterska –	UP	1200	3500	45	85	15	< 200
epoksidna –	EP	1200	3700	.55	105	12	< 80
poliuretanska – (tvrda)	PUR	1500	–	85	170	25	< 130

Mehanička i toplinska svojstva ukrućenih duroplasta
Svi duroplasti, ukrućeni punilima, mehanički su znatno poboljšani.

Duro-plast	Dodatak stakla (pletivo) %	Gust. kg/m^3	Modul elast. N/mm^2	Čvrstoća			Temper. rastez. 10^{-6} K^{-1}	Topl. vodljiv. W/(m.K)
				vlačna N/mm^2	na savij. N/mm^2	tlačna N/mm^2		
UP	25	1350	5000	70	120	120	35	0,15
	50	1600	10000	200	220	160	18	0,24
	65	1800	19000	300	350	280	15	0,26
	65*	1800	28000	500	550	400	12	0,26
EP	50	1600	10000	220	280	220	18	0,24
	65	1800	18000	350	400	300	15	0,26
	65*	1800	30000	700	800	600	12	0,26

* Uzdužni smjer pletiva.

Fenolna smola (fenoplast PF) upotrebljava se za manje opterećene predmete. (Armature, obloge kočnica, lopatična kola, izolacijski dijelovi – bakelit.)

Uratna smola (aminoplast) UF služi za malo opterećene predmete (sanitarnu tehniku, električne instalacije). U vezi sa prehranom je neupotrebiva!

Melaminska smola MF namijenjena je za predmete s većim opterećenjem, npr. za dekorativne ploče (ultrapas).

Poliesterska smola UP polimerizira se s ukrućivačem. (Cijevi, profili, posuđe, dijelovi pokućtva, dijelovi vozila, čamci, letjelice.)

Epoksidna smola EP se također polimerizira s ukrućivačem. Upotrebljava se za dijelove s većim zahtjevima. Ima natprosječnu adhezijsku sposobnost (araldit).

Poliuretanska smola PUR je u prvom redu elektrotehnički materijal.

Posebni proizvodi od plasta

Pjenasti plasti

Oni se proizvode posebnim tehnološkim postupkom (pjenušanjem plasta u žilavo-tekućem stanju). Karakteristični su za njih mala gustoća (5 . . . 400 kg/m^3) i sastav ćelija.

Sastav ćelija je ili s otvorenim ćelijama (s neposrednim prelazom plinova i tekućina) ili sa zatvorenim ćelijama (pri kojima je prelaz plinova i tekućina moguć jedino difuzijom).

Pjenasti plasti mogu biti krhko-tvrdi (lome se), žilavo tvrdi (pod tlakom se dijelom deformiraju) i meko-elastični.

Mehanička i toplinska svojstva pjenastih plasta

Pjenasti plast		Gustoća kg/m^3	Čvrstoća vlačna N/mm^2	Čvrstoća tlačna N/mm^2	Toplin. vodljivost W/(m. K)	Temperatura upotrebe °C
meko-tvrdi:	PF	40 . . . 100	0,1 . . . 0,4	0,2 . . . 0,9	0,025	< 130
	UF	5 . . . 15	–	0,01 . . . 0,05	0,03	< 90
žilavo tvrdi:	PS	15 . . . 30	0,1 . . . 0,5	0,06 . . . 0,25	0,032	70 . . . 80
		30 . . . 35	> 0,5	> 0,15	0,033	80 . . . 85
		40 . . . 60	> 0,5	> 0,5	0,033	80 . . . 85
	PVC	50 . . . 130	0,7 . . . 1,6	0,3 . . . 1,1	0,038	< 60
	PUR	20 . . . 100	0,2 . . . 1,1	0,1 . . . 0,9	0,021	< 80
meko-elastični:	PE*	25 . . . 40	0,1 . . . 0,2	–	0,036	< 100
		30 . . . 70	0,3 . . . 0,6	–	0,045	−70 . . . 85
		100 . . . 200	0,8 . . . 2,0	–	0,05	−70 . . . 110
	PVC*	50 . . . 70	0,3	–	0,036	−60 . . . 50
		100	0,5	–	0,041	−60 . . . 50
	PUR**	20 . . . 45	0,15	–	0,045	−40 . . . 100

* Pretežno zatvorene ćelije. – ** Pretežno otvorene ćelije.

Vlaknasti plasti

Vlaknasti plasti (sintetička vuna) proizvode se od odgovarajućih vrsta plasta i to iz njihove taline ili rastopine (suhim ili vlažnim postupkom).

Za proizvodnju vlakana dolaze u obzir u prvom redu:

– polietilen, polipropilen	– za vrpce, mreže (ribarske, plivaju na vodi)
– polistiren	– za vlakna promjera ≧ 10 μm
– vinilni (ko)polimeri	– za kemijski otporne proizvode (filteri, zaštita)
– akrilnitrilni polimeri	– za odjevne predmete (dralon, orlon . . .)
– poliamidi	– za odjevne predmete (perlon, najlon . . .)
– poliuretani	– za elastične odjevne predmete (čarape, kupaće gaćice)
– politereftalni kiseli ester	– za odjevne predmete (diolen, trevira . . .), često miješano vunom i pamukom, za tehn. upotrebu (remenje, transportne trake itd.)

ELEMENTI STROJEVA

Standardni brojevi

(JUS A.A0.001 – 1983)

Za brojčane vrijednosti različitih veličina (duljina, napon itd.) upotrebljavamo standardne brojeve (prema Renardu, prijedlog ISO).

Standardni brojevi su zaokružene vrijednosti članova geometrijskih redova sa stupnjevima

$\sqrt[5]{10}$, $\sqrt[10]{10}$, $\sqrt[20]{10}$, $\sqrt[40]{10}$ ili $\sqrt[80]{10}$

Razvrstani su u *osnovne redove* R 5, R 10, R 20 i R 40 te *izuzetni red* R 80. Njihove brojčane vrijednosti za decimalni interval od 1 do 10 vide se u tablici (desno).

Ograničenje reda označujemo — ako je potrebno — graničnim članom u zagradi, npr.

R 5 (16 . . .) R 10 (. . . 400)
R 20 (2,5 . . . 5)

Izvedeni redovi nastaju ako se iz nekog osnovnog ili izuzetnog reda standardnih brojeva uzme svaki drugi, treći, . . . *n*-ti član, npr.:

R 10/3 (. . . 80 . . .) je red koji sadrži svaki treći član iz osnovnog reda R 10, ali mora sadržavati standardni broj 80.

Osnovni redovi imaju prednost pred izuzetnim ili izvedenim redovima.

Ako je upotreba standardnih brojeva potpuno isključena, upotrebljavaju se *prilagođeni brojevi*:

1,05	2,1	2,4	3,5	4,8
1,1	2,2	2,6	3,6	5,5
1,2	2,25	3,2	3,8	7,0
1,3	2,35	3,4	4,2	

Osnovni redovi				Izuzetni red	
R 5	R 10	R 20	R 40	R 80	
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03
			1,06	1,06	1,09
		1,12	1,12	1,12	1,15
			1,18	1,18	1,22
	1,25	1,25	1,25	1,25	1,28
			1,32	1,32	1,36
		1,40	1,40	1,40	1,45
			1,50	1,50	1,55
1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,65
			1,70	1,70	1,75
		1,80	1,80	1,80	1,85
			1,90	1,90	1,95
	2,00	2,00	2,00	2,00	2,06
			2,12	2,12	2,18
		2,24	2,24	2,24	2,30
			2,36	2,36	2,43
2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,58
			2,65	2,65	2,72
		2,80	2,80	2,80	2,90
			3,00	3,00	3,07
	3,15	3,15	3,15	3,15	3,25
			3,35	3,35	3,45
		3,55	3,55	3,55	3,65
			3,75	3,75	3,87
4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,12
			4,25	4,25	4,37
		4,50	4,50	4,50	4,62
			4,75	4,75	4,87
	5,00	5,00	5,00	5,00	5,15
			5,30	5,30	5,45
		5,60	5,60	5,60	5,80
			6,00	6,00	6,15
6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,50
			6,70	6,70	6,90
		7,10	7,10	7,10	7,30
			7,50	7,50	7,75
	8,00	8,00	8,00	8,00	8,25
			8,50	8,50	8,75
		9,00	9,00	9,00	9,25
			9,50	9,50	9,75
10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	

Standardne duljinske mjere u mm (JUS A.A0.010 — 1959)

0,010...1 mm					1...10 mm				
R 5	R 10	R 20*		iz. vr.**	R 5	R 10	R 40*		iz. vr.**
0,0100	0,0100	0,0100			1,00	1,00	1,00		
		0,0112	0,011				1,06	1,05	
	0,0125	0,0125	0,012				1,12	1,1	
		0,0140					1,18	1,15	
0,0160	0,0160	0,0160		0,015		1,25	1,25	1,2	
		0,0180					1,32	1,3	
	0,0200	0,0200					1,40		
		0,0224	0,022				1,50		
0,0250	0,0250	0,0250			1,60	1,60	1,60		
		0,0280					1,70		
	0,0315	0,0315	0,032	0,030			1,80		
		0,0355	0,036	0,035			1,90		
0,0400	0,0400	0,0400				2,00	2,00		
		0,0450					2,12	2,1	
	0,0500	0,0500					2,24	2,2	
		0,0560		0,055			2,36	2,35	2,4
0,0630	0,0630	0,0630		0,060	2,50	2,50	2,50		
		0,0710		0,070			2,65		2,6
	0,0800	0,0800					2,80		
		0,0900					3,00		
0,100	0,100	0,100				3,15	3,15	3,2	
		0,112	0,11				3,35	3,4	
	0,125	0,125	0,12				3,55	3,6	3,5
		0,140					3,75	3,8	
0,160	0,160	0,160		0,15	4,00	4,00	4,00		
		0,180					4,25	4,2	
	0,200	0,200					4,50		
		0,224	0,22				4,75	4,8	
0,250	0,250	0,250				5,00	5,00		
		0,280					5,30		
	0,315	0,315	0,32	0,30			5,60		5,5
		0,355	0,36	0,35			6,00		
0,400	0,400	0,400			6,30	6,30	6,30		6,0
		0,450					6,70		6,5
	0,500	0,500					7,10		7,0
		0,560		0,55			7,50		
0,630	0,630	0,630		0,60		8,00	8,00		
		0,710		0,70			8,50		
	0,800	0,800					9,00		
		0,900					9,50		
1,000	1,000	1,000			10,00	10,00	10,00		

* Brojevi desno su prilagođeni brojevi. — ** »iz. vr.« = izuzetne vrijednosti.

10...100 mm					100...1000 mm			
R 5	R 10	R 40*		iz. vr.**	R 5	R 10	R 40*	
10	10	10			100	100	100	
		10,6	10,5				106	105
		11,2	11				112	110
		11,8	11,5				118	115
	12,5	12,5	12			125	125	120
		13,2	13				132	130
		14					140	
		15					150	
16	16	16			160	160	160	
		17					170	
		18					180	
		19					190	
	20	20				200	200	
		21,2	21				212	210
		22,4	22				224	220
		23,6	23,5	24			236	235
25	25	25			250	250	250	
		26,5		26			265	
		28					280	
		30					300	
	31,5	31,5	32			315	315	320
		33,5	34				335	340
		35,5	36	35			355	360
		37,5	38				375	380
40	40	40			400	400	400	
		42,5	42				425	420
		45					450	
		47,5	48				475	480
	50	50				500	500	
		53					530	
		56		55			560	
		60					600	
60	63	63			630	630	630	
		67		65			670	
		71		70			710	
		75					750	
	80	80				800	800	
		85					850	
		90					900	
		95					950	
100	100	100			1000	1000	1000	

* Brojevi desno su prilagođeni brojevi. — ** »iz. vr.« = izuzetne vrijednosti.

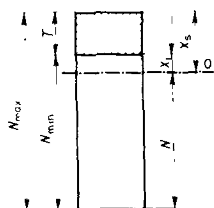
DOSJEDANJE STROJNIH DIJELOVA

Sustav dosjedanja ISO međunarodno je općenito uveden, a u nas i standardiziran.

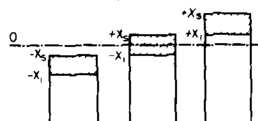
Tolerancije mjera prema ISO (JUS M.A1.110/111/112 - 1968)

a) Osnovni pojmovi

Nazivna mjera N	mjera koju unosimo u crteže. Obično je to zaokružena mjera (vidi standardne duljine na str. 484 i 485).
Stvarna mjera N_d	mjera, koju određujemo mjerenjem na izrađenom predmetu. U toj je mjeri uključena i netočnost mjerenja
Granična mjera	najveća ili najmanja mjera koju još dopuštamo
Najveća mjera N_{max}	veća od obiju graničnih mjera
Najmanja mjera N_{min}	manja od obiju graničnih mjera
Gornje odstupanje x_s	razlika između najveće i nazivne mjere ($N_{max} - N$)
Donje odstupanje x_i	razlika između najmanje i nazivne mjere ($N_{min} - N$)
Tolerancija mjere T	razlika između najveće i najmanje mjere ($T = N_{max} - N_{min}$)
Polje tolerancije	sve mjere u okviru tolerancije
Nul-linija (0)	crta u grafički prikazanom tolerancijskom polju, koja odgovara nazivnoj mjeri



Tolerancijsko polje može se rasprostirati s obje strane nul-linije, a može cijelo biti ispod nul-linije ili iznad nje (vidi donju sliku). Prema tome može gornje odstupanje biti pozitivno, a donje negativno, ili pak mogu oba odstupanja biti pozitivna ili negativna.



Temperatura pri mjerenju: 20 °C.

b) Osnovne tolerancije

Tolerancije su podijeljene u 18 osnovnih redova. Mjerimo ih međunarodnom jedinicom tolerancije i, koja ovisi o nazivnoj mjeri N, a određena je brojčanom jednadžbom

$$i = 0{,}45\sqrt[3]{N} + 0{,}001\ N$$

u kojoj mjerimo nazivnu mjeru N u mm, a mjeru tolerancije i u µm.

Red tolerancije	Tolerancija	Red tolerancije	Tolerancija	Red tolerancije	Tolerancija
IT 01	$0{,}3 + 0{,}008\,N$	IT 5	$7\,i$	IT 11	$100\,i$
IT 0	$0{,}5 + 0{,}012\,N$	IT 6	$10\,i$	IT 12	$160\,i$
IT 1	$0{,}8 + 0{,}020\,N$	IT 7	$16\,i$	IT 13	$250\,i$
IT 2	—*	IT 8	$25\,i$	IT 14	$400\,i$
IT 3	—*	IT 9	$40\,i$	IT 15	$640\,i$
IT 4	—*	IT 10	$64\,i$	IT 16	$1000\,i$

* Vrijednosti za redove tolerancija IT 2, IT 3 i IT 4 su geometrijski stupnjevane između redova IT 1 i IT 5.

Upotreba osnovnih tolerancija:

IT 01...IT 6 — uglavnom za preciznu mehaniku i mjerila,
IT 5...IT 11 — uglavnom za dosjede elemenata strojeva,
IT 12...IT 16 — za veće tolerancije pri obradi.

c) Položaj tolerancijskog polja

označen je s obzirom na nul-liniju slovima, i to

za vanjske mjere (rukavce) — malim slovima:

a b c cd d e ef f fg g h j (j_s) k m n p r s t u v x y z za zb zc

za unutarnje mjere (provrte) — velikim slovima:

A B C CD D E EF F FG G H J (J_s) K M N P R S T U V X Y Z ZA ZB ZC.

Tolerancijska polja a do h leže ispod nul-linije (polje h se dotiče nul-linije). Polje j seže s obje strane nul-linije, dok su polja k do zc iznad nje.

Tolerancijska polja A do H leže iznad nul-linije (polje H se dotiče nul-linije). Polje J seže s obje strane nul-linije, dok su polja K do ZC ispod nje.

d) Oznake tolerancijskih polja

Tolerancijska polja označujemo slovom (oznaka položaja tolerancijskog polja) i karakterističnom brojkom reda tolerancije, npr.

H 7 — znači tolerancijsko polje za provrt koje se rasprostire od nul-linije naviše za vrijednost IT 7 (= $16\,i$).

Sustav dosjedanja ISO obuhvaća tolerancijska polja u svim položajima od a do zc i od A do ZC, te svako sa svim osnovnim tolerancijama od IT 01 do IT 16. Međutim, s obzirom na potrebu da broj mjerila bude što manji, upotrebljavamo u praksi samo nekoliko najprikladnijih tolerancijskih polja.

Na str. 488 do 491 dane su vrijednosti onih tolerancijskih polja za provrte i rukavce koje, prema iskustvu u strojarstvu, većinom svuda zadovoljavaju (a odgovaraju 1. i 2. stupnju prednosti dopuštenih dosjedanja prema JUS M.A1.200/201/202/203 - 1968).

Tolerancije rukavaca (µm) (JUS M.A1.150...158 — 1968)

Nazivna mjera (mm)	a 11	c 11	d 9	e 8	f 7	g 6	h 6	h 8	h 9	h 11
...3	— 270 — 330	— 60 —120	— 20 — 45	— 14 — 28	— 6 — 16	— 2 — 8	0 — 6	0 —14	0 — 25	0 — 60
3)...6	— 270 — 345	— 70 —145	— 30 — 60	— 20 — 38	— 10 — 22	— 4 —12	0 — 8	0 —18	0 — 30	0 — 75
6)...10	— 280 — 370	— 80 —170	— 40 — 76	— 25 — 47	— 13 — 28	— 5 —14	0 — 9	0 —22	0 — 36	0 — 90
10)...18	— 290 — 400	— 95 —205	— 50 — 93	— 32 — 59	— 16 — 34	— 6 —17	0 —11	0 —27	0 — 43	0 —110
18)...30	— 300 — 430	—110 —240	— 65 —117	— 40 — 73	— 20 — 41	— 7 —20	0 —13	0 —33	0 — 52	0 —130
30)...40	— 310 — 470	—120 —280	— 80 —142	— 50 — 89	— 25 — 50	— 9 —25	0 —16	0 —39	0 — 62	0 —160
40)...50	— 320 — 480	—130 —290								
50)...65	— 340 — 530	—140 —330	—100 —174	— 60 —106	— 30 — 60	—10 —29	0 —19	0 —46	0 — 74	0 —190
65)...80	— 360 — 550	—150 —340								
80)...100	— 380 — 600	—170 —390	—120 —207	— 72 —126	— 36 — 71	—12 —34	0 —22	0 —54	0 — 87	0 —220
100)...120	— 410 — 630	—180 —400								
120)...140	— 460 — 710	—200 —450	—145 —245	— 85 —148	— 43 — 83	—14 —39	0 —25	0 —63	0 —100	0 —250
140)...160	— 520 — 770	—210 —460								
160)...180	— 580 — 830	—230 —480								
180)...200	— 660 — 950	—240 —530	—170 —285	—100 —172	— 50 — 96	—15 —44	0 —29	0 —72	0 —115	0 —290
200)...225	— 740 —1030	—260 —550								
225)...250	— 820 —1110	—280 —570								
250)...280	— 920 —1240	—300 —620	—190 —320	—110 —191	— 56 —108	—17 —49	0 —32	0 —81	0 —130	0 —320
280)...315	—1050 —1370	—330 —650								
315)...355	—1200 —1560	—360 —720	—210 —350	—125 —214	— 62 —119	—18 —54	0 —36	0 —89	0 —140	0 — 360
355)...400	—1350 —1710	—400 —760								
400)...450	—1500 —1900	—440 —840	—230 —385	—135 —232	— 68 —131	—20 —60	0 —40	0 —97	0 —155	0 —400
450)...500	—1650 —2050	—480 —880								

Nazivna mjera (mm)	j 6	k 6	n 6	r 6	s 6	u 8	x 8
...3	+ 4 — 2	+ 6 0	+10 + 4	+ 16 + 10	+ 20 + 14	+ 32 + 18	+ 34 + 20
3)...6	+ 6 — 2	+ 9 + 1	+16 + 8	+ 23 + 15	+ 27 + 19	+ 41 + 23	+ 46 + 28
6)...10	+ 7 — 2	+10 + 1	+19 +10	+ 28 + 19	+ 32 + 23	+ 50 + 28	+ 56 + 34
10)...14	+ 8 — 3	+12 + 1	+23 +12	+ 34 + 23	+ 39 + 28	+ 60 + 33	+67+40
14)...18							+72+45
18)...24	+ 9 — 4	+15 + 2	+28 +15	+ 41 + 28	+ 48 + 35	+74+41	+87+54
24)...30						+81+48	+97+64
30)...40	+11 — 5	+18 + 2	+33 +17	+ 50 + 34	+ 59 + 43	+ 99 + 60	+119 + 80
40)...50						+109 + 70	+136 + 97
50)...65	+12 — 7	+21 + 2	+39 +20	+ 60 + 41	+ 72 + 53	+133 + 87	+168 +122
65)...80				+ 62 + 43	+ 78 + 59	+148 +102	+192 +146
80)...100	+13 — 9	+25 + 3	+45 +23	+ 73 + 51	+ 93 + 71	+178 +124	+232 +178
100)...120				+ 76 + 54	+101 + 79	+198 +144	+264 +210
120)...140	+14 —11	+28 + 3	+52 +27	+ 88 + 63	+117 + 92	+233 +170	+311 +248
140)...160				+ 90 + 65	+125 +100	+253 +190	+343 +280
160)...180				+ 93 + 68	+133 +108	+273 +210	+373 +310
180)...200	+16 —13	+33 + 4	+60 +31	+106 + 77	+151 +122	+308 +236	+422 +350
200)...225				+109 + 80	+159 +130	+330 +258	+457 +385
225)...250				+113 + 84	+169 +140	+356 +284	+497 +425
250)...280	+16 —16	+36 + 4	+66 +34	+126 + 94	+190 +158	+396 +315	+556 +475
280)...315				+130 + 98	+202 +170	+431 +350	+606 +525
315)...355	+18 —18	+40 + 4	+73 +37	+144 +108	+226 +190	+479 +390	+679 +590
355)...400				+150 +114	+244 +208	+524 +435	+749 +660
400)...450	+20 —20	+45 + 5	+80 +40	+166 +126	+272 +232	+587 +490	+837 +740
450)...500				+172 +132	+292 +252	+637 +540	+917 +820

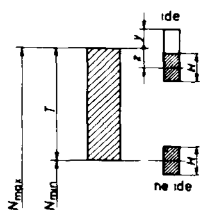
Tolerancije provrta (μm) (JUS M.A1.170...177 — 1968)

Nazivna mjera (mm)	A 11	C 11	D 10	E 9	F 8	G 7
...3	+ 330 + 270	+120 + 60	+ 60 + 20	+ 39 + 14	+ 20 + 6	+12 + 2
3)...6	+ 345 + 270	+145 + 70	+ 78 + 30	+ 50 + 20	+ 28 + 10	+16 + 4
6)...10	+ 370 + 280	+170 + 80	+ 98 + 40	+ 61 + 25	+ 35 + 13	+20 + 5
10)...18	+ 400 + 290	+205 + 95	+120 + 50	+ 75 + 32	+ 43 + 16	+24 + 6
18)...30	+ 430 + 300	+240 +110	+149 + 65	+ 92 + 40	+ 53 + 20	+28 + 7
30)...40	+ 470 + 310	+280 +120	+180 + 80	+112 + 50	+ 64 + 25	+34 + 9
40)...50	+ 480 + 320	+290 +130				
50)...65	+ 530 + 340	+330 +140	+220 +100	+134 + 60	+ 76 + 30	+40 +10
65)...80	+ 550 + 360	+340 +150				
80)...100	+ 600 + 380	+390 +170	+260 +120	+159 + 72	+ 90 + 36	+47 +12
100)...120	+ 630 + 410	+400 +180				
120)...140	+ 710 + 460	+450 +200	+305 +145	+185 + 85	+106 + 43	+54 +14
140)...160	+ 770 + 520	+460 +210				
160)...180	+ 830 + 580	+480 +230				
180)...200	+ 950 + 660	+530 +240	+355 +170	+215 +100	+122 + 50	+61 +15
200)...225	+1030 + 740	+550 +260				
225)...250	+1110 + 820	+570 +280				
250)...280	+1240 + 920	+620 +300	+400 +190	+240 +110	+137 + 56	+69 +17
280)...315	+1370 +1050	+650 +330				
315)...355	+1560 +1200	+720 +360	+440 +210	+265 +125	+151 + 62	+75 +18
355)...400	+1710 +1350	+760 +400				
400)...450	+1900 +1500	+840 +440	+480 +230	+290 +135	+165 + 68	+83 +20
450)...500	+2050 +1650	+880 +480				

Nazivna mjera (mm)	H 6	H 7	H 8	H 9	H 11
...3	+ 6 0	+10 0	+14 0	+ 25 0	+ 60 0
3)...6	+ 8 0	+12 0	+18 0	+ 30 0	+ 75 0
6)...10	+ 9 0	+15 0	+22 0	+ 36 0	+ 90 0
10)...18	+11 0	+18 0	+27 0	+ 43 0	+110 0
18)...30	+13 0	+21 0	+33 0	+ 52 0	+130 0
30)...40	+16 0	+25 0	+39 0	+ 62 0	+160 0
40)...50					
50)...65	+19 0	+30 0	+46 0	+ 74 0	+190 0
65)...80					
80)...100	+22 0	+35 0	+54 0	+ 87 0	+220 0
100)...120					
120)...140	+25 0	+40 0	+63 0	+100 0	+250 0
140)...160					
160)...180					
180)...200	+29 0	+46 0	+72 0	+115 0	+290 0
200)...225					
225)...250					
250)...280	+32 0	+52 0	+81 0	+130 0	+320 0
280)...315					
315)...355	+36 0	+57 0	+89 0	+140 0	+360 0
355)...400					
400)...450	+40 0	+63 0	+97 0	+155 0	+400 0
450)...500					

Tolerancije mjerila

Tolerancije mjerila za rukavce (JUS M.A1.310 – 1983)



N_{max} — najveća mjera rukavca
N_{min} — najmanja mjera rukavca
$T (= N_{max} - N_{min})$ — tolerancija mjere rukavca
H — tolerancija izrade mjerila za rukavce
z — položaj tolerancijskog polja za novo mjerilo »ide« ispod najveće mjere N_{max}
y — najveće odstupanje istrošenog mjerila »ide« iznad najveće mjere N_{max}

Mjerilo »ide« (dobro) mora ići preko rukavca. Odstupanja tog mjerila — mjerena od najveće mjere rukavca N_{max} — iznose:

odstupanja novog mjerila $-z \pm H/2$
gornje odstupanje istrošenog mjerila $+y$

Mjerilo »ne ide« (odmetak) — označujemo ga crvenom bojom — ne smije ići preko rukavca. Odstupanja tog mjerila — mjerena od najmanje mjere rukavca N_{min} — iznose: $\pm H/2$.

Vrijednosti H, z i y (µm) mjerila za rukavce

Nazivna mjera mm	Vrijednosti	Red tolerancije IT 6	7	8	9	11
1)...3	*H*	2	2	3	3	4
	z	1,5	1,5	2	5	10
	y	1,5	1,5	3	0	0
3)...6	*H*	2,5	2,5	4	4	5
	z	2	2	3	6	12
	y	1,5	1,5	3	0	0
6)...10	*H*	2,5	2,5	4	4	6
	z	2	2	3	7	14
	y	1,5	1,5	3	0	0
10)...18	*H*	3	3	5	5	8
	z	2,5	2,5	4	8	16
	y	2	2	4	0	0
18)...30	*H*	4	4	6	6	9
	z	3	3	5	9	19
	y	3	3	4	0	0
30)...50	*H*	4	4	7	7	11
	z	3,5	3,5	6	11	22
	y	3	3	5	0	0
50)...80	*H*	5	5	8	8	13
	z	4	4	7	13	25
	y	3	3	5	0	0
80)...120	*H*	6	6	10	10	15
	z	5	5	8	15	28
	y	4	4	6	0	0
120)...180	*H*	8	8	12	12	18
	z	6	6	9	18	32
	y	4	4	6	0	0

Tolerancije mjerila za provrte (JUS M.A1.310 – 1983)

N_{max} — najveća mjera provrta
N_{min} — najmanja mjera provrta
$T (= N_{max} - N_{min})$ — tolerancija mjere provrta
H — tolerancija izrade mjerila za provrt
z — položaj tolerancijskog polja za novo mjerilo »ide« iznad najmanje mjere N_{min}
y — najveće odstupanje istrošenog mjerila »ide« ispod najmanje mjere N_{min}

Mjerilo »ide« (dobro) mora pristajati u provrt. Odstupanja tog mjerila — mjerena od najmanje mjere provrta N_{min} — iznose:

odstupanja novog mjerila $+z \pm H/2$
donje odstupanje istrošenog mjerila $-y$

Mjerilo »ne ide« (odmetak) — označujemo ga crvenom bojom — ne smije pristajati u provrt. Odstupanja tog mjerila — mjerena od najveće mjere provrta N_{max} — iznose: $\pm H/2$.

Vrijednosti H, z i y (µm) mjerila za provrte

Nazivna mjera mm	Vrijednosti	Red tolerancije IT 6	7	8	9	10	11
1)...3	*H*	1,2	2	2	2	2	4
	z	1	1,5	2	5	5	10
	y	1	1,5	3	0	0	0
3)...6	*H*	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5
	z	1,5	2	3	6	6	12
	y	1	1,5	3	0	0	0
6)...10	*H*	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	6
	z	1,5	2	3	7	7	14
	y	1	1,5	3	0	0	0
10)...18	*H*	2	3	3	3	3	8
	z	2	2,5	4	8	8	16
	y	1,5	2	4	0	0	0
18)...30	*H*	2,5	4	4	4	4	9
	z	2	3	5	9	9	19
	y	1,5	3	4	0	0	0
30)...50	*H*	2,5	4	4	4	4	11
	z	2,5	3,5	6	11	11	22
	y	2	3	5	0	0	0
50)...80	*H*	3	5	5	5	5	13
	z	2,5	4	7	13	13	25
	y	2	3	5	0	0	0
80)...120	*H*	4	6	6	6	6	15
	z	3	5	8	15	15	28
	y	3	4	6	0	0	0
120)...180	*H*	5	8	8	8	8	18
	z	4	6	9	18	18	32
	y	3	4	6	0	0	0

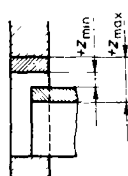
Dosjedi (nalijeganja)

a) Osnovni pojmovi

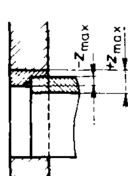
Dosjed	— oznaka međusobne podudarnosti dvaju strojnih dijelova, određena »zračnošću« ili »prisnošću«.
Zračnost (zazor) z	— razlika između unutarnje mjere većega vanjskog dijela (npr. provrta) i vanjske mjere manjega unutarnjeg dijela (npr. rukavca).
Najveća zračnost z_{max}	— razlika između najveće mjere vanjskog dijela i najmanje mjere unutarnjeg dijela.
Najmanja zračnost z_{min}	— razlika između najmanje mjere vanjskog dijela i najveće mjere unutarnjeg dijela.
Prisnost (preklop) $-z$	— »negativna zračnost« — razlika između vanjske mjere većega unutarnjeg dijela i unutarnje mjere manjega vanjskog dijela (prije sastavljanja obaju dijelova).
Najveća prisnost $-z_{max}$	— razlika između najveće mjere unutarnjeg dijela i najmanje mjere vanjskog dijela.
Najmanja prisnost $-z_{min}$	— razlika između najmanje mjere unutarnjeg dijela i najveće mjere vanjskog dijela.
Tolerancija dosjeda	— razlika između najveće i najmanje zračnosti (prisnosti). Jednaka je zbroju tolerancija vanjskog i unutarnjeg dijela.

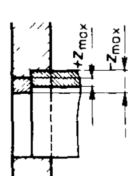
b) Vrste dosjeda

Labavi dosjed	— ima uvijek zračnost $(+z)$.
Prelazni dosjed	— ima — ovisno o stvarnoj mjeri obaju dijelova — zračnost $(+z)$ ili prisnost $(-z)$.
Čvrsti ili prisni dosjed	— ima uvijek prisnost $(-z)$.



Labavi dosjed





Prelazni dosjedi

Čvrsti dosjed

c) Sustavi dosjeda

Sustav jedinstvenog provrta ima provrte s tolerancijskim poljem u položaju H. Dosjedi su u tom sustavu određeni položajem tolerancijskog polja rukavca a ... zc, i to:

a ... h — labavi dosjedi
j ... zc — prelazni i čvrsti dosjedi.

Sustav jedinstvenog rukavca ima rukavce s tolerancijskim poljem u položaju h. U tom su sustavu dosjedi određeni položajem tolerancijskog polja provrta A ... ZC, i to

A ... H — labavi dosjedi
J ... ZC — prelazni i čvrsti dosjedi.

d) Izbor dosjeda

Prema preporuci ISO (JUS M.A1.200/201 — 1968) prednost imaju slijedeći dosjedi:

Prednosni dosjedi u sustavu jedinstvenog provrta

	1. prednost	2. prednost	3. prednost
H 6		— j6, k6	— g5, h5, j5, k5, m5, n5, p5, r5
H 7	— f6, h6, n6, r6	— g6, j6, k6, s6	— f6, m6, p6
H 8	— f7, h9, u8, x8	— d9, e8	— c9, f8, h8
H 9	— h9	— c11, h11	— d10, e9, f8, h8
H 11	— h9	— a11, c11, d9, h11	— b11, d11
H 12			— h12
H 13			— h13

Prednosni dosjedi u sustavu jedinstvenog rukavca

	1. prednost	2. prednost	3. prednost
h 5			— G6, H6, J6, K6, M6, N6, P6, R6
h 6	— F8, H7	— G7	— F7, J7, K7, M7, N7, P7, R7, S7
h 8	— F8, H8		— B9, C9, D9, E8, F7, H9
h 9	— C11, D10, E9, F8, H8	— H11	— H9
h 11	— C11, D10	— A11, H11	— B11, D9, D11, H9
h 12			— H12
h 13			— H13

Neki dosjedi s 3. prednosti, koji se preporučuju samo za ograničena područja promjera, nisu ovdje navedeni.

Tolerancije dosjeda s 1. i 2. prednosti, sabrane su na str. 496 do 499.

Tolerancije dosjeda u sustavu jedinstvenog rukavca (μm)

Nazivna mjera mm	A 11 h 11	C 11 h 11	D 10 h 11	C 11 h 9	D 10 h 9	E 9 h 9	F 8 h 9	F 8 h 8	F 8 h 6	G 7 h 6
1...3	+ 390 + 270	+ 180 + 60	+120 + 20	+ 145 + 60	+ 85 + 20	+ 64 + 14	+ 45 + 6	+ 34 + 6	+ 26 + 6	+ 18 + 2
3)...6	+ 420 + 270	+ 220 + 70	+153 + 30	+ 175 + 70	+108 + 30	+ 80 + 20	+ 58 + 10	+ 46 + 10	+ 36 + 10	+ 24 + 4
6)...10	+ 460 + 280	+ 260 + 80	+188 + 40	+ 206 + 80	+134 + 40	+ 97 + 25	+ 71 + 13	+ 57 + 13	+ 44 + 13	+ 29 + 5
10)...18	+ 510 + 290	+ 315 + 95	+230 + 50	+ 248 + 95	+163 + 50	+118 + 32	+ 86 + 16	+ 70 + 16	+ 54 + 16	+ 35 + 6
18)...30	+ 560 + 300	+ 370 + 110	+279 + 65	+ 292 + 110	+201 + 65	+144 40	+105 + 20	+ 86 + 20	+ 66 + 20	+ 41 + 7
30)...40	+ 630 + 310	+ 440 + 120	+340 + 80	+ 342 + 120	+242 + 80	+174 + 50	+126 + 25	+103 + 25	+ 80 + 25	+ 50 + 9
40)...50	+ 640 + 320	+ 450 + 130		+ 352 + 130						
50)...65	+ 720 + 340	+ 520 + 140	+410 +100	+ 404 + 140	+294 +100	+208 + 60	+150 + 30	+122 + 30	+ 95 + 30	+ 59 + 10
65)...80	+ 740 + 360	+ 530 + 150		+ 414 + 150						
80)...100	+ 820 + 380	+ 610 + 170	+480 +120	+ 477 + 170	+347 +120	+246 + 72	+177 + 36	+144 + 36	+112 + 36	+ 69 + 12
100)...120	+ 850 + 410	+ 620 + 180		+ 487 + 180						
120)...140	+ 960 + 460	+ 700 + 200	+555 +145	+ 550 + 200	+405 +145	+285 + 85	+206 + 43	+169 + 43	+131 + 43	+ 79 + 14
140)...160	+1020 + 520	+ 710 + 210		+ 560 + 210						
160)...180	+1080 + 580	+ 730 + 230		+ 580 + 230						
180)...200	+1240 + 660	+ 820 + 240	+645 +170	+ 645 + 240	+470 +170	+330 +100	+237 + 50	+194 + 50	+151 + 50	+ 90 + 15
200)...225	+1320 + 740	+ 840 + 260		+ 665 + 260						
225)...250	+1400 + 820	+ 860 + 280		+ 685 + 280						
250)...280	+1560 + 920	+ 940 + 300	+720 +190	+ 750 + 300	+530 +190	+370 +110	+267 + 56	+218 + 56	+169 + 56	+101 + 17
280)...315	+1690 +1050	+ 970 + 330		+ 780 + 330						
315)...355	+1920 +1200	+1080 + 360	+800 +210	+ 860 + 360	+580 +210	+405 +125	+291 + 62	+240 + 62	+187 + 62	+111 + 18
355)...400	+2070 +1350	+1120 + 400		+ 900 + 400						
400)...450	+2300 +1500	+1240 + 440	+880 +230	+ 995 + 440	+635 +230	+445 +135	+320 + 68	+262 + 68	+205 + 68	+123 + 20
450)...500	+2450 +1650	+1280 + 480		+1035 + 480						

Tolerancije dosjeda H — h (μm)

Nazivna mjera mm	H 11 h 11	H 9 H 11 h 11 h 9	H 9 h 9	H 8 h 9	H 8 h 8	H 7 h 6
1...3	+120 0	+ 85 0	+ 50 0	+ 39 0	+ 28 0	+ 16 0
3)...6	+150 0	+105 0	+ 60 0	+ 48 0	+ 36 0	+ 20 0
6)...10	+180 0	+126 0	+ 72 0	+ 58 0	+ 44 0	+ 24 0
10)...14	+220 0	+153 0	+ 86 0	+ 70 0	+ 54 0	+ 29 0
14)...18						
18)...24	+260 0	+182 0	+104 0	+ 85 0	+ 66 0	+ 34 0
24)...30						
30)...40	+320 0	+222 0	+124 0	+101 0	+ 78 0	+ 41 0
40)...50						
50)...65	+380 0	+264 0	+148 0	+120 0	+ 92 0	+ 49 0
65)...80						
80)...100	+440 0	+307 0	+174 0	+141 0	+108 0	+ 57 0
100)...120						
120)...140	+500 0	+350 0	+200 0	+163 0	+126 0	+ 65 0
140)...160						
160)...180						
180)...200	+580 0	+405 0	+230 0	+187 0	+144 0	+ 75 0
200)...225						
225)...250						
250)...280	+640 0	+450 0	+260 0	+211 0	+162 0	+ 84 0
280)...315						
315)...355	+720 0	+500 0	+280 0	+229 0	+178 0	+ 93 0
355)...400						
400)...450	+800 0	+555 0	+310 0	+252 0	+194 0	+103 0
450)...500						

Nazivna mjera mm	H 6 j 6	H 6 k 6	H 7 f 7	H 7 g 6	H 7 j 6	H 7 k 6	H 7 n 6	H 7 r 6	H 7 s 6
1...3	+ 8 − 4	+ 6 − 6	+ 26 + 6	+ 18 + 2	+12 − 4	+10 − 6	+ 6 −10	0 − 16	− 4 − 20
3)...6	+10 − 6	+ 7 − 9	+ 34 + 10	+ 24 + 4	+14 − 6	+11 − 9	+ 4 −16	− 3 − 23	− 7 − 27
6)...10	+11 − 7	+ 8 −10	+ 43 + 13	+ 29 + 5	+17 − 7	+14 −10	+ 5 −19	− 4 − 28	− 8 − 32
10)...18	+14 − 8	+10 −12	+ 52 + 16	+ 35 + 6	+21 − 8	+17 −12	+ 6 −23	− 5 − 34	− 10 − 39
18)...30	+17 − 9	+11 −15	+ 62 + 20	+ 41 + 7	+25 − 9	+19 −15	+ 6 −28	− 7 − 41	− 14 − 48
30)...40	+21 −11	+14 −18	+ 75 + 25	+ 50 + 9	+30 −11	+23 −18	+ 8 −33	− 9 − 50	− 18 − 59
40)...50									
50)...65	+26 −12	+17 −21	+ 90 + 30	+ 59 + 10	+37 −12	+28 −21	+10 −39	− 11 − 60	− 23 − 72
65)...80								− 13 − 62	− 29 − 78
80)...100	+31 −13	+19 −25	+106 + 36	+ 9 + 12	+44 −13	+32 −25	+12 −45	− 16 − 73	− 36 − 93
100)...120								− 19 − 76	− 44 −101
120)...140	+36 −14	+22 −28	+123 + 43	+ 79 + 14	+51 −14	+37 −28	+13 −52	− 23 − 88	− 52 −117
140)...160								− 25 − 90	− 60 −125
160)...180								− 28 − 93	− 68 −133
180)...200	+42 −16	+25 −33	+142 + 50	+ 90 + 15	+59 −16	+42 −33	+15 −60	− 31 −106	− 76 −151
200)...225								− 34 −109	− 84 −159
225)...250								− 38 −113	− 94 −169
250)...280	+48 −16	+28 −36	+160 + 56	+101 + 17	+68 −16	+48 −36	+18 −66	− 42 −126	−106 −190
280)...315								− 46 −130	−118 −202
315)...355	+54 −18	+32 −40	+176 + 62	+111 + 18	+75 −18	+53 −40	+20 −73	− 51 −144	−133 −226
355)...400								− 57 −150	−151 −244
400)...450	+60 −20	+35 −45	+194 + 68	+123 + 20	+83 −20	+58 −45	+23 −80	− 63 −166	−169 −272
450)...500								− 69 −172	−189 −292

Nazivna mjera mm	H 11 a 11	H 11 c 11	H 11 d 9	H 9 c 11	H 8 d 9	H 8 e 8	H 8 f 7	H 8 u 8	H 8 x 8
1...3	+ 390 + 270	+ 180 + 60	+105 + 20	+ 145 + 60	+ 59 + 20	+ 42 + 14	+ 30 + 6		− 6 − 34
3)...6	+ 420 + 270	+ 220 + 70	+135 + 30	+ 175 + 70	+ 78 + 30	+ 56 + 20	+ 40 + 10		− 10 − 46
6)...10	+ 460 + 280	+ 260 + 80	+166 + 40	+ 206 + 80	+ 98 + 40	+ 69 + 25	+ 50 + 13		− 12 − 56
10)...14	+ 510 + 290	+ 315 + 95	+203 + 50	+ 248 + 95	+120 + 50	+ 86 + 32	+ 61 + 16		-13/-67
14)...18									-18/-72
18)...24	+ 560 + 300	+ 370 + 110	+247 + 65	+ 292 + 110	+150 + 65	+106 + 40	+ 74 + 20		-21/-87
24)...30								-51/-81	-31/-97
30)...40	+ 630 + 310	+ 440 + 120	+302 + 80	+ 342 + 120	+181 + 80	+128 + 50	+ 89 + 25	− 21 − 99	− 41 −119
40)...50	+ 640 + 320	+ 450 + 130		+ 352 + 130				− 31 −109	− 58 −136
50)...65	+ 720 + 340	+ 520 + 140	+364 +100	+ 404 + 140	+220 +100	+152 + 60	+106 + 30	− 41 −133	− 76 −168
65)...80	+ 740 + 360	+ 530 + 150		+ 414 + 150				− 56 −148	−100 −192
80)...100	+ 820 + 380	+ 610 + 170	+427 +120	+ 477 + 170	+261 +120	+180 + 72	+125 + 36	− 70 −178	−124 −232
100)...120	+ 850 + 410	+ 620 + 180		+ 487 + 180				− 90 −198	−156 −264
120)...140	+ 960 + 460	+ 700 + 200	+495 +145	+ 550 + 200	+308 +145	+211 + 85	+146 + 43	−107 −233	−185 −311
140)...160	+1020 + 520	+ 710 + 210		+ 560 + 210				−127 −253	−217 −343
160)...180	+1080 + 580	+ 730 + 230		+ 580 + 230				−147 −273	−247 −373
180)...200	+1240 + 660	+ 820 + 240	+575 +170	+ 645 + 240	+357 +170	+244 +100	+168 + 50	−164 −308	−278 −422
200)...225	+1320 + 740	+ 840 + 260		+ 665 + 260				−186 −330	−313 −457
225)...250	+1400 + 820	+ 860 + 280		+ 685 + 280				−212 −356	−353 −497
250)...280	+1560 + 920	+ 940 + 300	+640 +190	+ 750 + 300	+401 +190	+272 +110	+189 + 56	−234 −396	−394 −556
280)...315	+1690 +1050	+ 970 + 330		+ 780 + 330				−269 −431	−444 −606
315)...355	+1920 +1200	+1080 + 360	+710 +210	+ 860 + 360	+439 +210	+303 +125	+208 + 62	−301 −479	−501 −679
355)...400	+2070 +1350	+1120 + 400		+ 900 + 400				−346 −524	
400)...450	+2300 +1500	+1240 + 440	+785 +230	+ 995 + 440	+482 +230	+329 +135	+228 + 68	−393 −587	
450)...500	+2450 +1650	+1280 + 480		+1035 + 480				−443 −637	

POVRŠINSKA HRAPAVOST
(JUS M.A1.020/021 — 1964)

Površinska hrapavost su mikrogeometrijske nepravilnosti na površini predmeta koje su mnogo puta manje od dimenzija promatranog dijela površine.

Pod pojam »hrapavost« ne svrstavamo makrogeometrijskih nepravilnosti površine kojih se dimenzije približuju duljinskoj mjeri promatrane površine ili je premašuju, npr. valovitost.



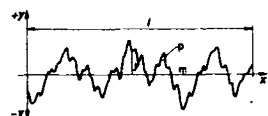
p — *profil* je presjek promatrane površine presječene određenom ravninom

l — *referentna duljina* je (dogovorena) duljina dijela profila izabranog za određivanje hrapavosti.

Referentne duljine l izabiremo prema vrsti i finoći obrade i mjernoj metodi:

Postupak obrade	Prikladna referentna duljina l (mm)				
blanjanje			2,5	8	25
glodanje, bušenje		0,8	2,5	8	
tokarenje, razvrtavanje		0,8	2,5		
brušenje	0,25	0,8	2,5		
honanje, lepanje	0,25	0,8			

Sistem srednje linije



m — *srednja linija profila* siječe profil p tako da je — u granicama referentne duljine l — zbroj kvadrata udaljenosti y svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu.

Prosječno odstupanje profila R_a je srednja aritmetička udaljenost profila od srednje linije

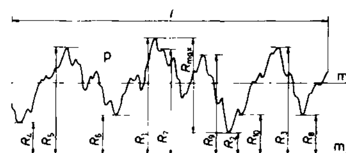
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| \, dx$$

Približna vrijednost prosječnog odstupanja profila iznosi

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i|$$

y odn. y_i uzimamo u apsolutnim vrijednostima — bez obzira na predznak + ili —.

Visine neravnina



p — profil
l — referentna duljina
m — srednja linija profila
m_z — paralela sa srednjom linijom koja ne siječe profil

Prosječna visina neravnina R_z (mjerena u 10 točaka) je razlika između srednjih aritmetičkih vrijednosti udaljenosti R, i to 5 najviših i 5 najnižih točaka profila — u granicama referentne duljine l — od bilo koje linije koja ne siječe profila, a paralelna je sa srednjom linijom

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + \ldots + R_9) - (R_2 + R_4 + \ldots + R_{10})}{5}$$

Najveća visina neravnina R_{max} je razmak između dvaju pravaca, paralelnih sa srednjom linijom, koji dotiču — u granicama referentne duljine l — najviše odnosno najniže točke profila

$$R_{max} = R_1 - R_2$$

Kao orijentacija služe izrazi:

$$R_z \approx 4\,R_a \qquad R_{max} \approx 1{,}6\,R_z \quad (\approx 6{,}4\,R_a)$$

Nošenje profila



p — profil
l — referentna duljina
m — srednja linija profila
m_c — paralela sa srednjom linijom, udaljena od najviše točke profila za razmak c

Duljina nošenja profila l_n je zbroj odsječaka što ih — u granicama referentne duljine l — profil odsijeca na paraleli sa srednjom linijom, a koji su udaljeni od najviše točke profila za razmak c

$$l_n = l_{c1} + l_{c2} + \ldots + l_{cn}$$

Za razmak c preporučuju se vrijednosti ovisno o najvećoj visini neravnina R_{max}:

R_{max} (μm)	... 1	1) ... 2,5	2,5) ... 4	4) ... 6
c (μm)	0,1	0,25	0,6	1,6

Postotak nošenja profila p_n

$$p_n = \frac{l_n}{l} 100 \ (\%)$$

U strojogradnji postotak nošenja neka ne bude veći od 40 %.

Stupanj površinske hrapavosti (JUS M.A0.065 – 1981) u ovisnosti o najvećem prosječnom odstupanju profila R_a

$R_{a\,max}$ µm	Stupanj hrapavosti	$R_{a\,max}$ µm	Stupanj hrapavosti	$R_{a\,max}$ µm	Stupanj hrapavosti
0,025	N 1	0,4	N 5	6,3	N 9
0,05	N 2	0,8	N 6	12,5	N 10
0,1	N 3	1,6	N 7	25	N 11
0,2	N 4	3,2	N 8	50	N 12

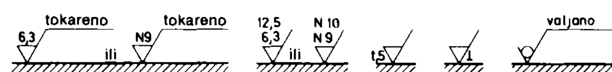
Oznake površinske hrapavosti u nacrtima (JUS M.A0.065 – 1981)

Oznake hrapavosti pri obradi odvajanjem čestica:

a – prosječna odstupanja profila R_a (µm) ili oznaka stupnja hrapavosti (N...),
b – postupak obrade,
c – referentna duljina *l*,
d – smjer obrade s obzirom na projekcijsku ravninu (usporedno: =, pravokutno: ⊥, unakrsno: ×, u više smjerova: M, približno kružno prema središtu: C, približno radijalno prema središtu: R),
e – dodatak za strojnu obradu,
f – drugi podaci o hrapavosti.

Oznaka hrapavosti bez obrade odvajanjem čestica:

Primjeri:



Odnos reda tolerancije i stupnja hrapavosti
(JUS M.A1.025 – 1981 in M.A0.065 – 1981)

Red tolerancije (ISO)	Stupanj hrapavosti za nazivne mjere (mm) ...3	3)...18	18)...80	80)...250	250)...
IT 5	N 3	N 4	N 5	N 5	N 6
IT 6	N 4	N 5	N 5	N 6	N 6
IT 7	N 5	N 5	N 6	N 7	N 7
IT 8	N 5	N 6	N 7	N 7	N 8
IT 9	N 6	N 6	N 7	N 8	N 9
IT 10	N 7	N 7	N 8	N 9	N 9
IT 11	N 7	N 8	N 9	N 9	N 10
IT 12	N 8	N 8	N 9	N 10	N 11
IT 13	N 9	N 9	N 10	N 11	N 11
IT 14	N 10	N 10	N 11	N 11	N 12

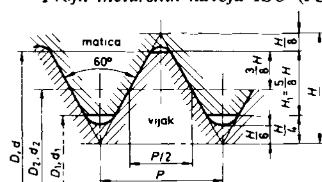
Postupak obrade u ovisnosti od stupnja hrapavosti

Postupak obrade	R_a(µm) 0,012	Razred hrapavosti N... 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	R_a(µm) 100	200	400	800
Ručna obrada																	
– grubo turpijanje										●	●	●	●	●	●	●	
– fino turpijanje							●	●	●	●							
Lijevanje																	
– u pijesak													●	●	●	●	●
– u kokilu										●	●	●	●				
– u školjku								●	●	●	●	●					
Kovanje																	
– toplo, slobodno														●	●	●	●
– toplo u ukovnju										●	●	●	●	●			
– hladno u ukovnju								●	●	●							
Valjanje																	
– toplo										●	●	●	●	●			
– hladno					●	●	●	●	●	●							
Pjeskarenje											●	●	●	●			
Tokarenje																	
– grubo									●	●	●	●	●	●	●		
– fino					●	●	●	●	●								
Blanjanje																	
– grubo											●	●	●	●	●		
– fino								●	●	●	●						
Glodanje																	
– grubo									●	●	●	●	●				
– fino						●	●	●	●								
Bušenje svrdlom										●	●	●	●	●			
Razvrtavanje					●	●	●	●	●	●							
Brušenje																	
– grubo								●	●	●	●	●					
– fino				●	●	●	●	●									
Poliranje																	
– mehaničko				●	●	●	●										
– električno		●	●	●	●	●											
Honanje, lepanje		●	●	●	●	●	●	●									
»Superfiniš«	●	●	●	●													
Obrada navoja																	
– rezanje							●	●	●	●	●	●					
– brušenje					●	●	●	●									
Obrada zubaca																	
– blanjanje								●	●								
– glodanje							●	●	●								
– brušenje					●	●	●	●									

NAVOJI

Metarski navoji s trokutnim profilom ISO

Profil metarskih navoja ISO (JUS M.B0.010 — 1972)



Korak navoja: P

Teoretska dubina navoja

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P = 0{,}866\,025\,P$$

Nosiva dubina navoja

$$H_1 = \frac{5}{8} H = 0{,}541\,266\,P$$

d, d_1, d_2 — promjeri unutarnjeg navoja (vijka)

D, D_1, D_2 — promjeri vanjskog navoja (matice)

$d = D \qquad d_1 = D_1 = d - 2H_1 \qquad d_2 = D_2 = d - 3/4 \cdot H_2$

Mjere u mm

P	H	$(5/8)H$	$(3/8)H$	$H/4$	$H/6$	$H/8$
0,2	0,173 2	0,108 3	0,065 0	0,043 3	0,028 9	0,021 7
0,25	0,216 5	0,135 3	0,081 2	0,054 1	0,036 1	0,027 1
0,3	0,259 8	0,162 4	0,097 4	0,065 0	0,043 3	0,032 5
0,35	0,303 1	0,189 4	0,113 7	0,075 8	0,050 5	0,037 9
0,4	0,346 4	0,216 5	0,129 9	0,086 6	0,057 7	0,043 3
0,45	0,389 7	0,243 6	0,146 1	0,097 4	0,065 0	0,048 7
0,5	0,433 0	0,270 6	0,162 4	0,108 3	0,072 2	0,054 1
0,6	0,519 6	0,324 8	0,194 9	0,129 9	0,086 6	0,065 0
0,7	0,606 2	0,378 9	0,227 3	0,151 6	0,101 0	0,075 8
0,75	0,649 5	0,406 0	0,243 6	0,162 4	0,108 3	0,081 2
0,8	0,692 8	0,433 0	0,259 8	0,173 2	0,115 5	0,086 6
1	0,866 0	0,541 3	0,324 8	0,216 5	0,144 3	0,108 3
1,25	1,082 5	0,676 6	0,405 9	0,270 6	0,180 4	0,135 3
1,5	1,299 0	0,811 9	0,487 1	0,324 8	0,216 5	0,162 4
1,75	1,515 5	0,947 2	0,568 3	0,378 9	0,252 6	0,189 4
2	1,732 1	1,082 5	0,649 5	0,433 0	0,288 7	0,216 5
2,5	2,165 1	1,353 2	0,811 9	0,541 3	0,360 8	0,270 6
3	2,598 1	1,623 8	0,974 3	0,649 5	0,433 0	0,324 8
3,5	3,031 1	1,894 4	1,136 7	0,757 8	0,505 2	0,378 9
4	3,464 1	2,165 1	1,299 0	0,866 0	0,577 4	0,433 0
4,5	3,897 1	2,435 7	1,461 4	0,974 3	0,649 5	0,487 1
5	4,330 1	2,706 3	1,623 8	1,082 5	0,721 7	0,541 3
5,5	4,763 1	2,977 0	1,786 2	1,190 8	0,793 9	0,595 4
6	5,196 2	3,247 6	1,948 6	1,299 0	0,866 0	0,649 5

Metarski normalni navoji (JUS M.B0.012 — 1972)

Oznaka*	P mm	$d = D$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	A mm²
M 1	0,25	1	0,838	0,729	0,377
M 1,1	0,25	1,1	0,938	0,829	0,494
M 1,2	0,25	1,2	1,038	0,929	0,626
M 1,4	0,3	1,4	1,205	1,075	0,836
M 1,6	0,35	1,6	1,373	1,221	1,08
M 1,8	0,35	1,8	1,573	1,421	1,47
M 2	0,4	2	1,740	1,567	1,79
M 2,2	0,45	2,2	1,908	1,713	2,13
M 2,5	0,45	2,5	2,208	2,013	2,98
M 3	0,5	3	2,675	2,459	4,48
M 3,5	0,6	3,5	3,110	2,850	6,00
M 4	0,7	4	3,545	3,242	7,45
M 4,5	0,75	4,5	4,013	3,688	10,1
M 5	0,8	5	4,480	4,134	12,7
M 6	1	6	5,350	4,917	17,9
(M 7)	1	7	6,350	5,917	26,3
M 8	1,25	8	7,188	6,647	32,8
(M 9)	1,25	9	8,188	7,647	43,8
M 10	1,5	10	9,026	8,376	52,3
(M 11)	1,5	11	10,026	9,376	65,9
M 12	1,75	12	10,863	10,106	76,2
M 14	2	14	12,701	11,835	105
M 16	2	16	14,701	13,835	144
M 18	2,5	18	16,376	15,294	175
M 20	2,5	20	18,376	17,294	225
M 22	2,5	22	20,376	19,294	282
M 24	3	24	22,051	20,752	325
M 27	3	27	25,051	23,752	427
M 30	3,5	30	27,727	26,211	519
M 33	3,5	33	30,727	29,211	647
M 36	4	36	33,402	31,670	759
M 39	4	39	36,402	34,670	913
M 42	4,5	42	39,077	37,129	1045
M 45	4,5	45	42,077	40,129	1224
M 48	5	48	44,752	42,587	1377
M 52	5	52	48,752	46,587	1652
M 56	5,5	56	52,428	50,046	1905
M 60	5,5	60	56,428	54,046	2227
M 64	6	64	60,103	57,505	2520
M 68	6	68	64,103	61,505	2888

* Deblje tiskane oznake su navoji koji u upotrebi imaju prvu prednost, a obično tiskane oznake su navoji koji imaju drugu prednost. Navoji u zagradama imaju treću prednost i valja ih upotrebljavati samo iznimno u prijeko potrebnim slučajevima.

Metarski fini (sitni) navoji (JUS M.B0.013 — 1972)

Oznaka[1] $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 1 × 0,2	0,870	0,783
M 1,1 × 0,2	0,970	0,883
M 1,2 × 0,2	1,070	0,983
M 1,4 × 0,2	1,270	1,183
M 1,6 × 0,2	1,470	1,383
M 1,8 × 0,2	1,670	1,583
M 2 × 0,25	1,838	1,729
M 2,2 × 0,25	2,038	1,929
M 2,5 × 0,35	2,273	2,121
M 3 × 0,35	2,773	2,621
M 3,5 × 0,35	3,273	3,121
M 4 × 0,5	3,675	3,459
M 4,5 × 0,5	4,175	3,959
M 5 × 0,5	4,675	4,459
(M 5,5 × 0,5)	5,175	4,959
M 6 × 0,75	5,513	5,188
(M 7 × 0,75)	6,513	6,188
M 8 × 1	7,350	6,917
M 8 × 0,75	7,513	7,188
(M 9 × 1)	8,350	7,917
(M 9 × 0,75)	8,513	8,188
M 10 × 1,25	9,188	8,647
M 10 × 1	9,350	8,917
M 10 × 0,75	9,513	9,188
(M 11 × 1)	10,350	9,917
(M 11 × 0,75)	10,513	10,188
M 12 × 1,5	11,026	10,376
M 12 × 1,25	11,188	10,647
M 12 × 1	11,350	10,917
M 14 × 1,5	13,026	12,376
(M 14 × 1,25)[2]	13,188	12,647
M 14 × 1	13,350	12,917

Oznaka[1] $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
(M 15 × 1,5)	14,026	13,376
(M 15 × 1)	14,350	13,917
M 16 × 1,5	15,026	14,376
M 16 × 1	15,350	14,917
(M 17 × 1,5)	16,026	15,376
(M 17 × 1)	16,350	15,917
M 18 × 2	16,701	15,835
M 18 × 1,5	17,026	16,376
M 18 × 1	17,350	16,917
M 20 × 2	18,701	17,835
M 20 × 1,5	19,026	18,376
M 20 × 1	19,350	18,917
M 22 × 2	20,701	19,835
M 22 × 1,5	21,026	20,376
M 22 × 1	21,350	20,917
M 24 × 2	22,701	21,835
M 24 × 1,5	23,026	22,376
M 24 × 1	23,350	22,917
(M 25 × 2)	23,701	22,835
(M 25 × 1,5)	24,026	23,376
(M 25 × 1)	24,350	23,917
(M 26 × 1,5)	25,026	24,376
M 27 × 2	25,701	24,835
M 27 × 1,5	26,026	25,376
M 27 × 1	26,350	25,917
(M 28 × 2)	26,701	25,835
(M 28 × 1,5)	27,026	26,376
(M 28 × 1)	27,350	26,917
(M 30 × 3)[3]	28,051	26,752
M 30 × 2	28,701	27,835
M 30 × 1,5	29,026	28,376
M 30 × 1	29,350	28,917
(M 32 × 2)	30,701	29,835
(M 32 × 1,5)	31,026	30,376
(M 33 × 3)[3]	31,051	29,752
M 33 × 2	31,701	30,835
M 33 × 1,5	32,026	31,376

[1] Vidi napomenu na str. 505! – [2] Samo za svjećice motora s unutarnjim izgaranjem.
[3] Po mogućnosti ne upotrebljavati!

Oznaka[1] $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
(M 35 × 1,5)[4]	34,026	33,376
M 36 × 3	34,051	32,752
M 36 × 2	34,701	33,835
M 36 × 1,5	35,026	34,376
(M 38 × 1,5)	37,026	36,376
M 39 × 3	37,051	35,752
M 39 × 2	37,701	36,835
M 39 × 1,5	38,026	37,376
(M 40 × 3)	38,051	36,752
(M 40 × 2)	38,701	37,835
(M 40 × 1,5)	39,026	38,376
M 42 × 4	39,402	37,670
M 42 × 3	40.051	38,752
M 42 × 2	40,701	39,835
M 42 × 1,5	41,026	40,376
M 45 × 4	42,402	40,670
M 45 × 3	43,051	41,752
M 45 × 2	43,701	42.835
M 45 × 1,5	44,026	43,376
M 48 × 4	45,402	43,670
M 48 × 3	46,051	44,752
M 48 × 2	46,701	45,835
M 48 × 1,5	47,026	46,376
(M 50 × 3)	48,051	46,752
(M 50 × 2)	48,701	47,835
(M 50 × 1,5)	49,026	48,376
M 52 × 4	49,402	47,670
M 52 × 3	50,051	48,752
M 52 × 2	50,701	49,835
M 52 × 1,5	51,026	50,376
(M 55 × 4)	52,402	50,670
(M 55 × 3)	53,051	51,752
(M 55 × 2)	53,701	52,835
(M 55 × 1,5)	54,026	53,376
M 56 × 4	53,402	51,670
M 56 × 3	54,051	52,752
M 56 × 2	54,701	53,835
M 56 × 1,5	55,026	54,376

Oznaka[1] $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
(M 58 × 4)	55,402	53,670
(M 58 × 3)	56,051	54,752
(M 58 × 2)	56,701	55,835
(M 58 × 1,5)	57,026	56,376
M 60 × 4	57,402	55,670
M 60 × 3	58,051	56,752
M 60 × 2	58,701	57,835
M 60 × 1,5	59,026	58,376
(M 62 × 4)	59,402	57,670
(M 62 × 3)	60,051	58,752
(M 62 × 2)	60,701	59,835
(M 62 × 1,5)	61,026	60,376
M 64 × 4	61,402	59,670
M 64 × 3	62,051	60,752
M 64 × 2	62,701	61,835
M 64 × 1,5	63,026	62,376
(M 65 × 4)	62,402	60,670
(M 65 × 3)	63,051	61,752
(M 65 × 2)	63,701	62,835
(M 65 × 1,5)	64,026	63,376
M 68 × 4	65,402	63,670
M 68 × 3	66,051	64,752
M 68 × 2	66,701	65,835
M 68 × 1,5	67,026	66,376
(M 70 × 6)	66,103	63,505
(M 70 × 4)	67,402	65,670
(M 70 × 3)	68,051	66,752
(M 70 × 2)	68,701	67,835
(M 70 × 1,5)	69,026	68,376
M 72 × 6	68,103	65,505
M 72 × 4	69,402	67,670
M 72 × 3	70,051	68,752
M 72 × 2	70,701	69,835
M 72 × 1,5	71,026	70,376
(M 75 × 4)	72,402	70,670
(M 75 × 3)	73,051	71,752
(M 75 × 2)	73,701	72,835
(M 75 × 1,5)	74,026	73,376

[4] Samo za matice za učvršćivanje valjnih ležaja.

Oznaka* $d\,(= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 76 × 6	72,103	69,505
M 76 × 4	73,402	71,670
M 76 × 3	74,051	72,752
M 76 × 2	74,701	73,835
M 76 × 1,5	75,026	74,376
(M 78 × 2)	76,701	75,835
M 80 × 6	76,103	73,505
M 80 × 4	77,402	75,670
M 80 × 3	78,051	76,752
M 80 × 2	78,701	77,835
M 80 × 1,5	79,026	78,376
(M 82 × 2)	80,701	79,835
M 85 × 6	81,103	78,505
M 85 × 4	82,402	80,670
M 85 × 3	83,051	81,752
M 85 × 2	83,701	82,835
M 90 × 6	86,103	83,505
M 90 × 4	87,402	85,670
M 90 × 3	88,051	86,752
M 90 × 2	88,701	87,835
M 95 × 6	91,103	88,505
M 95 × 4	92,402	90,670
M 95 × 3	93,051	91,752
M 95 × 2	93,701	92,835
M 100 × 6	96,103	93,505
M 100 × 4	97,402	95,670
M 100 × 3	98,051	96,752
M 100 × 2	98,701	97,835
M 105 × 6	101,103	98,505
M 105 × 4	102,402	100,670
M 105 × 3	103,051	101,752
M 105 × 2	103,701	102,835
M 110 × 6	106,103	103,505
M 110 × 4	107,402	105,670
M 110 × 3	108,051	106,752
M 110 × 2	108,701	107,835
M 115 × 6	111,103	108,505
M 115 × 4	112,402	110,670
M 115 × 3	113,051	111,752
M 115 × 2	113,701	112,835
M 120 × 6	116,103	113,505
M 120 × 4	117,402	115,670
M 120 × 3	118,051	116,752
M 120 × 2	118,701	117,835
M 125 × 6	121,103	118,505
M 125 × 4	122,402	120,670
M 125 × 3	123,051	121,752
M 125 × 2	123,701	122,835
M 130 × 6	126,103	123,505
M 130 × 4	127,402	125,670
M 130 × 3	128,051	126,752
M 130 × 2	128,701	127,835
(M 135 × 6)	131,103	128,505
(M 135 × 4)	132,402	130,670
(M 135 × 3)	133,051	131,752
(M 135 × 2)	133,701	132,835
M 140 × 6	136,103	133,505
M 140 × 4	137,402	135,670
M 140 × 3	138,051	136,752
M 140 × 2	138,701	137,835
(M 145 × 6)	141,103	138,505
(M 145 × 4)	142,402	140,670
(M 145 × 3)	143,051	141,752
(M 145 × 2)	143,701	142,835
M 150 × 6	146,103	143,505
M 150 × 4	147,402	145,670
M 150 × 3	148,051	146,752
M 150 × 2	148,701	147,835
(M 155 × 6)	151,103	148,505
(M 155 × 4)	152,402	150,670
(M 155 × 3)	153,051	151,752
M 160 × 6	156,103	153,505
M 160 × 4	157,402	155,670
M 160 × 3	158,051	156,752
(M 165 × 6)	161,103	158,505
(M 165 × 4)	162,402	160,670
(M 165 × 3)	163,051	161,752

* Vidi napomenu na str. 505!

Oznaka* $d\,(= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 170 × 6	166,103	163,505
M 170 × 4	167,402	165,670
M 170 × 3	168,051	166,752
(M 175 × 6)	171,103	168,505
(M 175 × 4)	172,402	170,670
(M 175 × 3)	173,051	171,752
M 180 × 6	176,103	173,505
M 180 × 4	177,402	175,670
M 180 × 3	178,051	176,752
(M 185 × 6)	181,103	178,505
(M 185 × 4)	182,402	180,670
(M 185 × 3)	183,051	181,752
M 190 × 6	186,103	183,505
M 190 × 4	187,402	185,670
M 190 × 3	188,051	186,752
(M 195 × 6)	191,103	188,505
(M 195 × 4)	192,402	190,670
(M 195 × 3)	193,051	191,752
M 200 × 6	196,103	193,505
M 200 × 4	197,402	195,670
M 200 × 3	198,051	196,752
(M 205 × 6)	201,103	198,505
(M 205 × 4)	202,402	200,670
(M 205 × 3)	203,051	201,752
M 210 × 6	206,103	203,505
M 210 × 4	207,402	205,670
M 210 × 3	208,051	206,752
(M 215 × 6)	211,103	208,505
(M 215 × 4)	212,402	210,670
(M 215 × 3)	213,051	211,752
M 220 × 6	216,103	213,505
M 220 × 4	217,402	215,670
M 220 × 3	218,051	216,752
(M 225 × 6)	221,103	218,505
(M 225 × 4)	222,402	220,670
(M 225 × 3)	223,051	221,752
(M 230 × 6)	226,103	223,505
(M 230 × 4)	227,402	225,670
(M 230 × 3)	228,051	226,752
(M 235 × 6)	231,103	228,505
(M 235 × 4)	232,402	230,670
(M 235 × 3)	233,051	231,752
M 240 × 6	236,103	233,505
M 240 × 4	237,402	235,670
M 240 × 3	238,051	236,752
(M 245 × 6)	241,103	238,505
(M 245 × 4)	242,402	240,670
(M 245 × 3)	243,051	241,752
M 250 × 6	246,103	243,505
M 250 × 4	247,402	245,670
M 250 × 3	248,051	246,752
(M 255 × 6)	251,103	248,505
(M 255 × 4)	252,402	250,670
M 260 × 6	256,103	253,505
M 260 × 4	257,402	255,670
(M 265 × 6)	261,103	258,505
(M 265 × 4)	262,402	260,670
(M 270 × 6)	266,103	263,505
(M 270 × 4)	267,402	265,670
(M 275 × 6)	271,103	268,505
(M 275 × 4)	272,402	270,670
M 280 × 6	276,103	273,505
M 280 × 4	277,402	275,670
(M 285 × 6)	281,103	278,505
(M 285 × 4)	282,402	280,670
(M 290 × 6)	286,103	283,505
(M 290 × 4)	287,402	285,670
(M 295 × 6)	291,103	288,505
(M 295 × 4)	292,402	290,670
M 300 × 6	296,103	293,505
M 300 × 4	297,402	295,670

* Vidi napomenu na str. 505!

Tolerancije metarskih navoja (ISO)
(JUS M.B0.220 — 1967, 221 — 1974)

Nazivni promjeri navoja jesu promjeri profila navoja ISO (vidi str. 504 do 509). To su:

veliki nazivni promjeri *d, D* srednji nazivni promjeri d_2, D_2
mali nazivni promjeri d_1, D_1

Malim slovima označujemo vanjski navoj (vijak), a velikima unutarnji navoj (maticu).

Stvarni promjeri navoja su promjeri koje određujemo mjerenjem izrađenog navoja, a sadrže netočnosti mjerenja.

Granični promjeri navoja su najveći i najmanji promjeri koje još dopuštamo.

Gornje odnosno donje odstupanje je razlika između najvećeg odnosno najmanjeg promjera i nazivnog promjera navoja.

Gornja odstupanja velikog, srednjeg i malog promjera navoja:
vijka a_{max} a_{2max} a_{1max}
matice A_{max} A_{2max} A_{1max}

Donja odstupanja velikog, srednjeg i malog promjera navoja:
vijka a_{min} a_{2min} a_{1min}
matice A_{min} A_{2min} A_{1min}

Tolerancija promjera navoja je razlika između gornjeg i donjeg odstupanja (odn. između najvećeg i najmanjeg promjera).

Tolerancija je određena veličinom i položajem s obzirom na nazivni promjer.

Veličine tolerancija su određene sa 7 stupnjeva, koje označujemo brojkama 3 do 9, od kojih upotrebljavamo:

za promjere	veličine tolerancija
d	4, 6, 8
d_2, d_1	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
D_2, D_1	4, 5, 6, 7, 8

Tolerancije velikoga promjera navoja matice *D* nisu propisane.

Položaj tolerancije s obzirom na nazivni promjer označujemo slovima. Određeno je:

5 položaja za navoje vijaka: e, g, h, k, p i 2 položaja za navoje matica: G, H

Ti su položaji tolerancija: e, g — ispod nazivnog promjera vijka, h — tik ispod nazivnog promjera vijka, k, p — iznad nazivnog promjera vijka, G — iznad nazivnog promjera matice, H — tik iznad nazivnog promjera matice.

Oznaka tolerancije je kombinacija oznaka za veličinu tolerancije i njezin položaj (npr. 6h).

Primjer oznake tolerancije:
- za metarski vijčani navoj M20 s tolerancijom 6h: M20 – 6h
- za isti navoj, ali s tolerancijom 4k za srednji promjer i 6h za veliki promjer: M20 – 4k6h
- za metarski navoj M20 s tolerancijom 6H: M20 – 6H.

Nosiva duljina l (tj. duljina dodira između matice i vijka u smjeru osi) određena je korakom *P* i srednjim nazivnim promjerom vijka *d*.

Normalna nosiva duljina l_N

d mm	P mm	l_N* mm
0,99)... 1,4	0,2	0,5)...1,4
	0,25	0,6)...1,7
	0,3	0,7)...2
1,4)... 2,8	0,2	0,5)...1,5
	0,25	0,6)...1,9
	0,35	0,8)...2,6
	0,4	1)...3
	0,45	1,3)...3,8
2,8)... 5,6	0,35	1)...3
	0,5	1,5)...4,5
	0,6	1,7)...5
	0,7	2)...6
	0,75	2,2)...6,7
	0,8	2,5)...7,5
5,6)...11,2	0,75	2,4)...7,1
	1	3)...9
	1,25	4)...12
	1,5	5)...15
11,2)...22,4	1	3,8)...11
	1,25	4,5)...13
	1,5	5,6)...16
	1,75	6)...18

d mm	P mm	l_N* mm
11,2)...22,4	2	8)...24
	2,5	10)...30
22,4)... 45	1	4)...12
	1,5	6,3)...19
	2	8,5)...25
	3	12)...36
	3,5	15)...45
	4	18)...53
	4,5	21)...63
45)... 90	1,5	7,5)...22
	2	9,5)...28
	3	15)...45
	4	19)...56
	5	24)...71
	5,5	28)...85
	6	32)...95
90)...180	2	12)...36
	3	18)...53
	4	24)...71
	6	36)...106
180)...355	3	20)...60
	4	26)...80
	6	40)...118

* Kratka nosiva duljina $l_S < l_{N\,min}$, duga nosiva duljina $l_L > l_{N\,max}$.

Preporučene tolerancije (ovisno o kvaliteti tolerancije i nosivoj duljini *l*)

Kvaliteta izrade navoja		Preporučene tolerancije za navoj vijka – Nosiva duljina			Preporučene tolerancije za navoj matice – Nosiva duljina		
		l_S	l_N	l_L	l_S	l_N	l_L
fina	— bez labavosti	3h 4h	4h	5h 4h	4H	5H	6H
	— mala prisnost	4k 6h*	4k 6h*	4k 6h*			
	— veća prisnost	3p 4h	3p 4h	3p 4h			
srednja	— velika labavost		6e	7e 6e			
	— mala labavost	5g 6g	6g	7g 6g	5G	6G	7G
	— bez labavosti	5h 6h	6h	7h 6h	5H	6H	7H
gruba	— mala labavost		8g	9g 8g		7G	8G
	— bez labavosti					7H	8H

* Također 3k 4h.

Odstupanja (po JUS M.B0.230 – 1967 i M.B0.232 – 1974) za preporučene tolerancije uz nosivu duljinu l_N sabrana su na str. 512 do 518.

Tolerancije srednjega promjera navoja vijka d_2

Gornje i donje odstupanje $a_{2\,max}$ i $a_{2\,min}$ (µm)

Nazivni promjer *d* mm	Korak *P* mm	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k6h	3p4h
1,5)...2,8	0,2	—	—	−17 −67	0 −50	0 −32	—	—
	0,25	—	—	−18 −74	0 −56	0 −36	—	—
	0,35	—	—	−19 −82	0 −63	0 −40	—	—
	0,4	—	—	−19 −86	0 −67	0 −42	—	—
	0,45	—	—	−20 −91	0 −71	0 −45	—	—
2,8)...5,6	0,35	—	—	−19 −86	0 −67	0 −42	—	—
	0,5	−50 −125	—	−20 −95	0 −75	0 −48	+32 −16	+68 +30
	0,6	−53 −138	—	−21 −106	0 −85	0 −53	+39 −14	+73 +31
	0,7	−56 −146	—	−22 −112	0 −90	0 −56	+44 −12	+77 +32
	0,75	−56 −146	—	−22 −112	0 −90	0 −56	+44 −12	+77 +32
	0,8	−60 −155	−24 −174	−24 −119	0 −95	0 −60	+48 −12	+82 +34
5,6)...11,2	0,75	−56 −156	—	−22 −122	0 −100	0 −63	+51 −12	+82 +32
	1	−60 −172	−26 −206	−26 −138	0 −112	0 −71	+63 −8	+92 +36
	1,25	−63 −181	−28 −218	−28 −146	0 −118	0 −75	+70 −5	+98 +38
	1,5	−67 −199	−32 −244	−32 −164	0 −132	0 −85	+82 −3	+109 +42
11,2)...22,4	1	−60 −178	−26 −216	−26 −144	0 −118	0 −75	+75 0	+96 +36
	1,25	−63 −195	−28 −240	−28 −160	0 −132	0 −85	+85 0	+105 +38
	1,5	−67 −207	−32 −256	−32 −172	0 −140	0 −90	+90 0	+113 +42
	1.75	−71 −221	−34 −270	−34 −184	0 −150	0 −95	+95 0	+119 +44
	2	−71 −231	−38 −288	−38 −198	0 −160	0 −100	+100 0	+128 +48
	2,5	−80 −250	−42 −307	−42 −212	0 −170	0 −106	+106 0	+137 +52
22,4)...45	1	−60 −185	−26 −226	−26 −151	0 −125	0 −80	+80 0	+99 +36
	1,5	−67 −217	−32 −268	−32 −182	0 −150	0 −95	+95 0	+117 +42
	2	−71 −241	−38 −303	−38 −208	0 −170	0 −106	+106 0	+133 +48
	3	−85 −285	−48 −363	−48 −248	0 −200	0 −125	+125 0	+158 +58
	3,5	−90 −302	−53 −388	−53 −265	0 −212	0 −132	+132 0	+169 +63
	4	−95 −319	−60 −415	−60 −284	0 −224	0 −140	+140 0	+182 +70
	4,5	−100 −336	−63 −438	−63 −299	0 −236	0 −150	+150 0	+191 +73
45)...90	1,5	−67 −227	−32 −282	−32 −192	0 −160	0 −100	+100 0	+122 +42
	2	−71 −251	−38 −318	−38 −218	0 −180	0 −112	+112 0	+138 +48
	3	−85 −297	−48 −383	−48 −260	0 −212	0 −132	+132 0	+164 +58
	4	−95 −331	−60 −435	−60 −296	0 −236	0 −150	+150 0	+188 +70
	5	−106 −356	−71 −471	−71 −321	0 −250	0 −160	+160 0	+206 +81
	5,5	−112 −377	−75 −500	−75 −340	0 −265	0 −170	—	—
	6	−118 −398	−80 −530	−80 −360	0 −280	0 −180	—	—
90)...180	2	−71 −261	−38 −338	−38 −228	0 −190	0 −118	+118 0	+143 +48
	3	−85 −309	−48 −403	−48 −272	0 −224	0 −140	+140 0	+170 +58
	4	−95 −345	−60 −460	−60 −310	0 −250	0 −160	+160 0	+195 +70
	6	−118 −418	−80 −555	−80 −380	0 −300	0 −190	—	—
180)...355	3	−85 −335	−48 −448	−48 −298	0 −250	0 −160	+160 0	+183 +58
	4	−95 −375	−60 −510	−60 −340	0 −280	0 −180	+180 0	+210 +70
	6	−118 −433	−80 −580	−80 −395	0 −315	0 −200	—	—

Tolerancije srednjega promjera navoja matice D_2

Gornje odstupanje $A_{2\,max}$ (μm)

(Donje odstupanje $A_{2\,min}$ za sve tolerancije H je 0)

Nazivni promjer $D = d$ mm	Korak P mm	Tolerancije 7G		6G		7H	6H	5H
1,5)...2,8	0,2	—		—		—	—	—
	0,25	—		—		—	—	+60
	0,35	—		+104	+19	—	+85	+67
	0,4	—		+109	+19	—	+90	+71
	0,45	—		+115	+20	—	+95	+75
2,8)...5,6	0,35	—		+109	+19	—	+90	+71
	0,5	+145	+20	+120	+20	+125	+100	+80
	0,6	+161	+21	+133	+21	+140	+112	+90
	0,7	+172	+22	+140	+22	+150	+118	+95
	0,75	+172	+22	+140	+22	+150	+118	+95
	0,8	+184	+24	+149	+24	+160	+125	+100
5,6)...11,2	0,75	+192	+22	+154	+22	+170	+132	+106
	1	+216	+26	+176	+26	+190	+150	+118
	1,25	+228	+28	+188	+28	+200	+160	+125
	1,5	+256	+32	+212	+32	+224	+180	+140
11,2)...22,4	1	+226	+26	+186	+26	+200	+160	+125
	1,25	+252	+28	+208	+28	+224	+180	+140
	1,5	+268	+32	+222	+32	+236	+190	+150
	1,75	+284	+34	+234	+34	+250	+200	+160
	2	+303	+38	+250	+38	+265	+212	+170
	2,5	+322	+42	+266	+42	+280	+224	+180
22,4)...45	1	+238	+26	+196	+26	+212	+170	+132
	1,5	+282	+32	+232	+32	+250	+200	+160
	2	+318	+38	+262	+38	+280	+224	+180
	3	+383	+48	+313	+48	+335	+265	+212
	3,5	+408	+53	+333	+53	+355	+280	+224
	4	+435	+60	+360	+60	+375	+300	+236
	4,5	+463	+63	+378	+63	+400	+315	+250
45)...90	1,5	+297	+32	+244	+32	+265	+212	+170
	2	+338	+38	+274	+38	+300	+236	+190
	3	+403	+48	+328	+48	+355	+280	+224
	4	+460	+60	+375	+60	+400	+315	+250
	5	+496	+71	+406	+71	+425	+335	+265
	5,5	+525	+75	+430	+75	+450	+355	+280
	6	+555	+80	+455	+80	+475	+375	+300
90)...180	2	+353	+38	+288	+38	+315	+250	+200
	3	+423	+48	+348	+48	+375	+300	+236
	4	+485	+60	+395	+60	+425	+335	+265
	6	+580	+80	+480	+80	+500	+400	+315
180)...355	3	+473	+48	+383	+48	+425	+335	+265
	4	+535	+60	+435	+60	+475	+375	+300
	6	+610	+80	+505	+80	+530	+425	+335

Tolerancije velikog promjera navoja vijka d

Gornje i donje odstupanje a_{max} i a_{min} (μm)

Korak P mm	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k6h	3p4h
0,2	—	—	—17 —73	0 —56	0 —36	0 —56	—
0,25	—	—	—18 —85	0 —67	0 —42	0 —67	—
0,35	—	—	—19 —104	0 —85	0 —53	0 —85	0 —53
0,4	—	—	—19 —114	0 —95	0 —60	0 —95	0 —60
0,45	—	—	—20 —120	0 —100	0 —63	0 —100	0 —63
0,5	—50 —156	—	—20 —126	0 —106	0 —67	0 —106	0 —67
0,6	—53 —178	—	—21 —146	0 —125	0 —80	0 —125	0 —80
0,7	—56 —196	—	—22 —162	0 —140	0 —90	0 —140	0 —90
0,75	—56 —196	—	—22 —162	0 —140	0 —90	0 —140	0 —90
0,8	—60 —210	—24 —260	—24 —174	0 —150	0 —95	0 —150	0 —95
1	—60 —240	—26 —306	—26 —206	0 —180	0 —112	0 —180	0 —112
1,25	—63 —275	—28 —363	—28 —240	0 —212	0 —132	0 —212	0 —132
1,5	—67 —303	—32 —407	—32 —268	0 —236	0 —150	0 —236	0 —150
1,75	—71 —336	—34 —459	—34 —299	0 —265	0 —170	0 —265	0 —170
2	—71 —351	—38 —488	—38 —318	0 —280	0 —180	0 —280	0 —180
2,5	—80 —415	—42 —572	—42 —377	0 —335	0 —212	0 —335	0 —212
3	—85 —460	—48 —648	—48 —423	0 —375	0 —236	0 —375	0 —236
3,5	—90 —515	—53 —723	—53 —478	0 —425	0 —265	0 —425	0 —265
4	—95 —570	—60 —810	—60 —535	0 —475	0 —300	0 —475	0 —300
4,5	—100 —600	—63 —863	—63 —563	0 —500	0 —315	0 —500	0 —315
5	—106 —636	—71 —921	—71 —601	0 —530	0 —335	0 —530	0 —335
5,5	—112 —672	—75 —975	—75 —635	0 —560	0 —355	0 —560	0 —355
6	—118 —718	—80 —1030	—80 —680	0 —600	0 —375	0 —600	0 —375

Tolerancije malog promjera navoja vijka d_1

Gornje i donje odstupanje $a_{1\,max}$ i $a_{1\,min}$ (μm)

Nazivni promjer *d* mm	Korak *P* mm	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k6h	3p4h
1,5)...2,8	0,2	—	—	— 46 —110	— 29 — 93	— 29 — 75	—	—
	0,25	—	—	— 54 —128	— 36 —110	— 36 — 90	—	—
	0,35	—	—	— 70 —158	— 51 —139	— 51 —116	—	—
	0,4	—	—	— 77 —173	— 58 —154	— 58 —129	—	—
	0,45	—	—	— 85 —188	— 65 —168	— 65 —142	—	—
2,8)...5,6	0,35	—	—	— 70 —162	— 51 —143	— 51 —118	—	—
	0,5	—122 —233	—	— 92 —203	— 72 —183	— 72 —156	—124 —208	— 78 —152
	0,6	—140 —268	—	—108 —236	— 87 —215	— 87 —183	—144 —240	— 99 —184
	0,7	—157 —297	—	—123 —263	—101 —241	—101 —207	—163 —269	—119 —214
	0,75	—164 —308	—	—130 —274	—108 —252	—108 —218	—174 —284	—130 —229
	0,8	—176 —329	—140 —348	—140 —293	—116 —269	—116 —234	—185 —303	—139 —245
5,6)...11,2	0,75	—164 —318	—	—130 —284	—108 —262	—108 —225	—174 —291	—130 —234
	1	—204 —388	—170 —422	—170 —354	—144 —328	—144 —287	—224 —367	—180 —308
	1,25	—243 —451	—208 —488	—208 —416	—180 —388	—180 —345	—275 —440	—232 —382
	1,5	—284 —524	—249 —569	—249 —489	—217 —457	—217 —410	—327 —520	—282 —457
11,2)...22,4	1	—204 —394	—170 —432	—170 —360	—144 —334	—144 —291	—224 —371	—180 —312
	1,25	—243 —465	—208 —510	—208 —430	—180 —402	—180 —355	—275 —450	—232 —389
	1,5	—284 —532	—249 —581	—249 —497	—217 —465	—217 —415	—327 —525	—282 —461
	1,75	—324 —600	—287 —649	—287 —563	—253 —529	—253 —474	—378 —599	—334 —535
	2	—360 —664	—327 —721	—327 —631	—289 —593	—289 —533	—432 —676	—384 —608
	2,5	—441 —791	—403 —848	—403 —753	—361 —711	—361 —647	—540 —826	—488 —753
22,4)...45	1	— 204 — 401	— 170 — 442	— 170 — 367	— 144 — 341	— 144 — 296	— 224 — 376	— 180 — 315
	1,5	— 284 — 542	— 249 — 593	— 249 — 507	— 217 — 475	— 217 — 420	— 327 — 530	— 282 — 465
	2	— 360 — 674	— 327 — 736	— 327 — 641	— 289 — 603	— 289 — 539	— 432 — 682	— 384 — 613
	3	— 518 — 934	— 481 —1012	— 481 — 897	— 433 — 849	— 433 — 774	— 648 — 989	— 590 — 906
	3,5	— 595 —1059	— 558 —1145	— 558 —1022	— 505 — 969	— 505 — 889	— 756 —1140	— 693 —1051
	4	— 672 —1184	— 637 —1280	— 637 —1149	— 577 —1089	— 577 —1005	— 864 —1292	— 794 —1194
	4,5	— 750 —1310	— 713 —1412	— 713 —1273	— 650 —1210	— 650 —1124	— 972 —1446	— 899 —1341
45)...90	1,5	— 284 — 552	— 249 — 607	— 249 — 517	— 217 — 485	— 217 — 425	— 327 — 535	— 282 — 470
	2	— 360 — 684	— 327 — 751	— 327 — 651	— 289 — 613	— 289 — 545	— 432 — 688	— 384 — 618
	3	— 518 — 946	— 481 —1032	— 481 — 909	— 433 — 861	— 433 — 781	— 648 — 996	— 590 — 912
	4	— 672 —1196	— 637 —1300	— 637 —1161	— 577 —1101	— 577 —1015	— 864 —1302	— 794 —1200
	5	— 828 —1438	— 793 —1553	— 793 —1403	— 722 —1332	— 722 —1242	—1080 —1600	— 999 —1484
	5,5	— 906 —1567	— 869 —1690	— 869 —1530	— 794 —1455	— 794 —1360	—	—
	6	— 984 —1696	— 946 —1828	— 946 —1658	— 866 —1578	— 866 —1478	—	—
90)...180	2	— 360 — 694	— 327 — 771	— 327 — 661	— 289 — 623	— 289 — 551	— 432 — 694	— 384 — 623
	3	— 518 — 958	— 481 —1052	— 481 — 921	— 433 — 873	— 433 — 789	— 648 —1004	— 590 — 918
	4	— 672 —1210	— 637 —1325	— 637 —1175	— 577 —1115	— 577 —1025	— 864 —1312	— 794 —1207
	6	— 984 —1716	— 946 —1853	— 946 —1678	— 866 —1598	— 866 —1488	—	—
180)...355	3	— 518 — 984	— 481 —1097	— 481 — 947	— 433 — 899	— 433 — 809	— 648 —1024	— 590 — 931
	4	— 672 —1240	— 637 —1375	— 637 —1205	— 577 —1145	— 577 —1045	— 864 —1332	— 794 —1222
	6	— 984 —1731	— 946 —1878	— 946 —1693	— 866 —1613	— 866 —1498	—	—

Tolerancije malog promjera navoja matice D_1

Gornje odstupanje $A_{1\,max}$ (μm)

(Donje odstupanje $A_{1\,min}$ za sve tolerancije H je 0)

Korak P mm	Tolerancije 7 G		6 G		7 H	6 H	5 H
0,2	—		—		—	—	—
0,25	—		—		—	—	+ 56
0,35	—		+119	+19	—	+100	+ 80
0,4	—		+131	+19	—	+112	+ 90
0,45	—		+145	+20	—	+125	+100
0,5	+200	+20	+160	+20	+ 180	+140	+112
0,6	+221	+21	+181	+21	+ 200	+160	+125
0,7	+246	+22	+202	+22	+ 224	+180	+140
0,75	+258	+22	+212	+22	+ 236	+190	+150
0,8	+274	+24	+224	+24	+ 250	+200	+160
1	+326	+26	+262	+26	+ 300	+236	+190
1,25	+363	+28	+293	+28	+ 335	+265	+212
1,5	+407	+32	+332	+32	+ 375	+300	+236
1,75	+459	+34	+369	+34	+ 425	+335	+265
2	+513	+38	+413	+38	+ 475	+375	+300
2,5	+602	+42	+492	+42	+ 560	+450	+355
3	+678	+48	+548	+48	+ 630	+500	+400
3,5	+763	+53	+613	+53	+ 710	+560	+450
4	+810	+60	+660	+60	+ 750	+600	+475
4,5	+913	+63	+733	+63	+ 850	+670	+530
5	+ 971	+71	+781	+71	+ 900	+710	+560
5,5	+1025	+75	+825	+75	+ 950	+750	+600
6	+1080	+80	+880	+80	+1000	+800	+630

Navojni dosjedi

Pod *navojnim dosjedom* razumijevamo međusobnu podudarnost vijka i matice.

Zračnost (zazor) navojnog dosjeda je razlika između većeg promjera matice i manjeg promjera vijka.

Prisnost (preklop) navojnog dosjeda je razlika između manjeg promjera matice i većeg promjera vijka.

Tolerancija navojnog dosjeda je razlika između najveće i najmanje zračnosti (odnosno prisnosti) navojnog dosjeda.

Vrste navojnih dosjeda

Labavi navojni dosjedi: H/e, H/g

Npr. vijci i matice za opću upotrebu

— gruba kvaliteta 7H/8g — srednja kvaliteta **6H/6e, 6H/6g**

— fina kvaliteta 5H/4h

Prelazni navojni dosjedi: H/h

Čvrsti navojni dosjedi: H/k, H/p

Npr. za čvrsto (s prisnošću) pritegnute vijke i matice

— čvrsto pritezanje 6H/4k6h — vrlo čvrsto pritezanje 5H/3p4h

Cijevni navoji

(JUS M.B0.056 — 1952)

Profil cijevnih navoja (Whitworthov)

Broj navoja na 25,4 mm: n

Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$

Teoretska dubina navoja

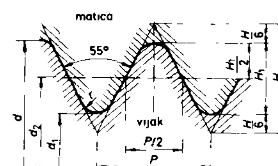
$H = 0{,}960\,49\,P$

Nosiva dubina navoja

$H_1 = 0{,}640\,33\,P$

Zaobljenost

$r = 0{,}137\,33\,P$



Veliki promjer navoja d

Mali promjer navoja $d_1 = d - 2H_1$

Srednji promjer navoja $d_2 = d - H_1$

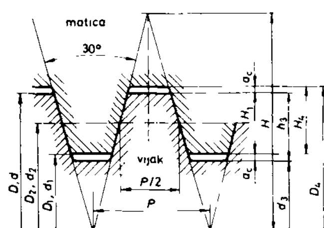
Oznaka*	d mm	n	P mm	Oznaka*	d mm	n	P mm
R $^1/_8$	9,728	28	0,907	R $3^1/_2$	100,330	11	2,309
R $^1/_4$	13,157	19	1,337	R $3^3/_4$	106,680	11	2,309
R $^3/_8$	16,662	19	1,337	R 4	113,030	11	2,309
R $^1/_2$	20,955	14	1,814	R $4^1/_2$	125,730	11	2,309
R $^5/_8$	22,911	14	1,814	R 5	138,430	11	2,309
R $^3/_4$	26,441	14	1,814	R $5^1/_2$	151,130	11	2,309
R $^7/_8$	30,201	14	1,814	R 6	163,830	11	2,309
R 1	33,249	11	2,309	R 7	189,230	10	2,540
(R $1^1/_8$)	37,897	11	2,309	R 8	214,630	10	2,540
R $1^1/_4$	41,910	11	2,309	R 9	240,030	10	2,540
(R $1^3/_8$)	44,323	11	2,309	R 10	265,430	10	2,540
R $1^1/_2$	47,803	11	2,309	R 11	290,830	8	3,175
R $1^3/_4$	53,746	11	2,309	R 12	316,230	8	3,175
R 2	59,614	11	2,309	R 13	347,472	8	3,175
R $2^1/_4$	65,710	11	2,309	R 14	372,872	8	3,175
R $2^1/_2$	75,184	11	2,309	R 15	398,272	8	3,175
R $2^3/_4$	81,534	11	2,309	R 16	423,672	8	3,175
R 3	87,884	11	2,309	R 17	449,072	8	3,175
R $3^1/_4$	93,980	11	2,309	R 18	474,472	8	3,175

* Oznaka (nazivni promjer) daje približan unutarnji promjer cijevi u (napuštenim) colima. — Treba se po mogućnosti kloniti dimenzija u zagradama.

Trapezni navoji

(JUS M.B0.060 — 1977)

Profil trapeznih navoja



Korak navoja P

Dubina osnovnoga profila navoja (= nosiva dubina) $H_1 = 0{,}5\,P$

Nazivna dubina navoja
— vijka $h_3 = H_1 + a_c$
— matice $H_4 = H_1 + a_c$

Zračnost a_c

Zaobljenost
— na tjemenu R_1
— u korijenu R_2

Mjere profila trapeznoga navoja (mm)

P	H_1	a_c	$h_3 = H_4$	R_{1max}	R_{2max}	P	H_1	a_c	$h_3 = H_4$	R_{1max}	R_{2max}
1,5	0,75	0,15	0,9	0,075	0,15	14	7	1	8	0,5	1
2	1	0,25	1,25	0,125	0,25	16	8	1	9	0,5	1
3	1,5	0,25	1,75	0,125	0,25	18	9	1	10	0,5	1
4	2	0,25	2,25	0,125	0,25	20	10	1	11	0,5	1
5	2,5	0,25	2,75	0,125	0,25	22	11	1	12	0,5	1
6	3	0,5	3,5	0,25	0,5	24	12	1	13	0,5	1
7	3,5	0,5	4	0,25	0,5	28	14	1	15	0,5	1
8	4	0,5	4,5	0,25	0,5	32	16	1	17	0,5	1
9	4,5	0,5	5	0,25	0,5	36	18	1	19	0,5	1
10	5	0,5	5,5	0,25	0,5	40	20	1	21	0,5	1
12	6	0,5	6,5	0,25	0,5	44	22	1	23	0,5	1

Veliki promjer navoja — vijka d $(= D)$
— matice $D_4 = d + 2a_c$

Mali promjer navoja — vijka $d_3 = d - 2h_3$
— matice $D_1 = d - 2H_1$ $(= d_1)$

Srednji promjer navoja $d_2 = D_2 = d - H_1$

Presjek jezgre $A = d_3^2\pi/4$

Viševojni trapezni navoji

Korak navoja P n-vojnih navoja veći je n-puta od koraka jednovojnog navoja, dok sve druge mjere ostaju nepromijenjene.

*

Trapezne navoje upotrebljavamo posebno za radna vretena.

Mjere standardiziranih trapeznih navoja su na str. 521 do 523.

Trapezni navoji (JUS M.B0.061/062 — 1977)

Oznaka*	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm²
Tr 8 × 1,5	1,5	8	7,25	6,2	6,5	8,3	30,2
Tr 9 × 2	2	9	8	6,5	7	9,5	33,2
Tr 10 × 1,5	1,5	10	9,25	8,2	8,5	10,3	52,8
Tr 10 × 2	2	10	9	7,5	8	10,5	44,2
Tr 11 × 2	2	11	10	8,5	9	11,5	56,7
Tr 12 × 2	2	12	11	9,5	10	12,5	70,9
Tr 12 × 3	3	12	10,5	8,5	9	12,5	56,7
Tr 14 × 3	3	14	12,5	10,5	11	14,5	86,6
Tr 16 × 2	2	16	15	13,5	14	16,5	143
Tr 16 × 4	4	16	14	11,5	12	16,5	104
Tr 18 × 4	4	18	16	13,5	14	18,5	143
Tr 20 × 2	2	20	19	17,5	18	20,5	241
Tr 20 × 4	4	20	18	15,5	16	20,5	189
Tr 22 × 5	5	22	19,5	16,5	17	22,5	214
Tr 24 × 3	3	24	22,5	20,5	21	24,5	330
Tr 24 × 5	5	24	21,5	18,5	19	24,5	269
Tr 24 × 8	8	24	20	15	16	25	177
Tr 26 × 5	5	26	23,5	20,5	21	26,5	330
Tr 28 × 3	3	28	26,5	24,5	25	28,5	471
Tr 28 × 5	5	28	25,5	22,5	23	28,5	398
Tr 28 × 8	8	28	24	19	20	29	284
Tr 30 × 6	6	30	27	23	24	31	415
Tr 32 × 3	3	32	30,5	28,5	29	32,5	638
Tr 32 × 6	6	32	29	25	26	33	491
Tr 32 × 10	10	32	27	21	22	33	346
Tr 34 × 6	6	34	31	27	28	35	573
Tr 36 × 3	3	36	34,5	32,5	33	36,5	830
Tr 36 × 6	6	36	33	29	30	37	661
Tr 36 × 10	10	36	31	25	26	37	491
Tr 38 × 7	7	38	34,5	30	31	39	707
Tr 40 × 3	3	40	38,5	36,5	37	40,5	1046
Tr 40 × 7	7	40	36,5	32	33	41	804
Tr 40 × 10	10	40	35	29	30	41	661
Tr 42 × 7	7	42	38,5	34	35	43	908
Tr 44 × 3	3	44	42,5	40,5	41	44,5	1 288
Tr 44 × 7	7	44	40,5	36	37	45	1018
Tr 44 × 10	10	44	38	31	32	45	755
Tr 46 × 8	8	46	42	37	38	47	1075

* Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Oznaka*	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm²
Tr 48 × 3	3	48	46,5	44,5	45	48,5	1 555
Tr 48 × 8	8	48	44	39	40	49	1 195
Tr 48 × 12	12	48	42	35	36	49	962
Tr 50 × 8	8	50	46	41	42	51	1 320
Tr 52 × 3	3	52	50,5	48,5	49	52,5	1 847
Tr 52 × 8	8	52	48	43	44	53	1 452
Tr 52 × 12	12	52	46	39	40	53	1 195
Tr 55 × 9	9	55	50,5	45	46	56	1 590
Tr 60 × 3	3	60	58,5	56,5	57	60,5	2 507
Tr 60 × 9	9	60	55,5	50	51	61	1 963
Tr 60 × 14	14	60	53	44	46	62	1 521
Tr 65 × 10	10	65	60	54	55	66	2 290
Tr 70 × 4	4	70	68	65,5	66	70,5	3 370
Tr 70 × 10	10	70	65	59	60	71	2 734
Tr 70 × 16	16	70	62	52	54	72	2 124
Tr 75 × 10	10	75	70	64	65	76	3 217
Tr 80 × 4	4	80	78	75,5	76	80,5	4 477
Tr 80 × 10	10	80	75	69	70	81	3 739
Tr 80 × 16	16	80	72	62	64	82	3019
Tr 85 × 12	12	85	79	72	73	86	4072
Tr 90 × 4	4	90	88	85,5	86	90,5	5 741
Tr 90 × 12	12	90	84	77	78	91	4 657
Tr 90 × 18	18	90	81	70	72	92	3 848
Tr 95 × 12	12	95	89	82	83	96	5 281
Tr 100 × 4	4	100	98	95,5	96	100,5	7 163
Tr 100 × 12	12	100	94	87	88	101	5945
Tr 100 × 20	20	100	90	78	80	102	4 778
(Tr 105 × 12)	12	105	99	92	93	106	6 648
Tr 110 × 12	12	110	104	97	98	111	7 390
(Tr 115 × 14)	14	115	108	99	101	117	7 698
Tr 120 × 6	6	120	117	113	114	121	10029
Tr 120 × 14	14	120	113	104	106	122	8 495
Tr 120 × 22	22	120	109	96	98	122	7 238
(Tr 125 × 14)	14	125	118	109	111	127	9 331
Tr 130 × 14	14	130	123	114	116	132	10 207
(Tr 135 × 14)	14	135	128	119	121	137	11 122
Tr 140 × 6	6	140	137	133	134	141	13 893
Tr 140 × 14	14	140	133	124	126	142	12076
Tr 140 × 24	24	140	128	114	116	142	10 207

* Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

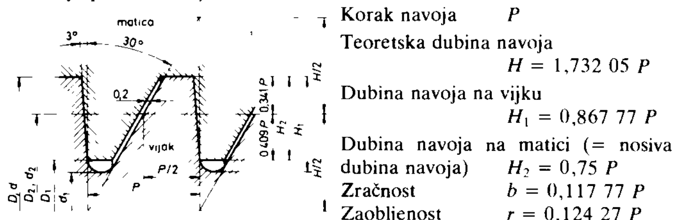
Oznaka*	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm²
(Tr 145 × 14)	14	145	138	129	131	147	13070
Tr 150 × 16	16	150	142	132	134	152	13 685
(Tr 155 × 16)	16	155	147	137	139	157	14 741
Tr 160 × 6	6	160	157	153	154	161	18 385
Tr 160 × 16	16	160	152	142	144	162	15 837
Tr 160 × 28	28	160	146	130	132	162	13 273
(Tr 165 × 16)	16	165	157	147	149	167	16 972
Tr 170 × 16	16	170	162	152	154	172	18 146
(Tr175 × 16)	16	175	167	157	159	177	19 359
Tr 180 × 8	8	180	176	171	172	181	22 966
Tr 180 × 18	18	180	171	160	162	182	20 106
Tr 180 × 28	28	180	166	150	152	182	17 671
(Tr 185 × 18)	18	185	176	165	167	187	21 382
Tr 190 × 18	18	190	181	170	172	192	22 698
(Tr 195 × 18)	18	195	186	175	177	197	24 053
Tr 200 × 8	8	200	196	191	192	201	28 652
Tr 200 × 20	20	200	191	180	182	202	25 447
Tr 200 × 33	33	200	184	166	168	202	21 642
Tr 210 × 20	20	210	200	188	190	212	27 759
Tr 220 × 8	8	220	216	211	212	221	34 967
Tr 220 × 20	20	220	210	198	200	222	30 791
Tr 220 × 36	36	220	202	182	184	222	26016
Tr 230 × 20	20	230	220	208	210	232	33 979
Tr 240 × 8	8	240	236	231	232	241	41 910
Tr 240 × 22	22	240	229	216	218	242	36 644
Tr 240 × 36	36	240	222	202	204	242	32 047
Tr 250 × 22	22	250	239	226	228	252	40 115
Tr 260 × 12	12	260	254	247	248	261	47 916
Tr 260 × 22	22	260	249	236	238	262	43 744
Tr 260 × 40	40	260	240	218	220	262	37 325
Tr 270 × 24	24	270	258	244	246	272	46 759
Tr 280 × 12	12	280	274	267	268	281	55 990
Tr 280 × 24	24	280	268	254	256	282	50 671
Tr 280 × 40	40	280	260	238	240	282	44 488
Tr 290 × 24	24	290	278	264	266	292	54 739
Tr 300 × 12	12	300	294	287	288	301	64 692
Tr 300 × 24	24	300	288	274	276	302	58 965
Tr 300 × 44	44	300	278	254	256	302	50 671

* Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Pilasti navoji

(JUS M.B0.070 – 1981)

Profil pilastih navoja



Korak navoja P

Teoretska dubina navoja $H = 1{,}732\,05\,P$

Dubina navoja na vijku $H_1 = 0{,}867\,77\,P$

Dubina navoja na matici (= nosiva dubina navoja) $H_2 = 0{,}75\,P$

Zračnost $b = 0{,}117\,77\,P$

Zaobljenost $r = 0{,}124\,27\,P$

Mjere profila pilastog navoja (mm)

P	H_1	H_2	b	r	P	H_1	H_2	b	r
2	1,736	1,5	0,236	0,249	16	13,884	12	1,884	1,988
3	2,603	2,25	0,353	0,373	18	15,620	13,5	2,120	2,237
4	3,471	3	0,471	0,497	20	17,355	15	2,355	2,485
5	4,339	3,75	0,589	0,621	22	19,091	16,5	2,591	2,734
6	5,207	4,5	0,707	0,746	24	20,826	18	2,826	2,982
7	6,074	5,25	0,824	0,870	26	22,562	19,5	3,062	3,231
8	6,942	6	0,942	0,994	28	24,298	21	3,298	3,480
9	7,810	6,75	1,060	1,118	32	27,769	24	3,769	3,977
10	8,678	7,5	1,178	1,243	36	31,240	27	4,240	4,474
12	10,413	9	1,413	1,491	40	34,711	30	4,711	4,971
14	12,149	10,5	1,649	1,740	44	38,182	33	5,182	5,468

Veliki promjer navoja – vijka d
– matice $D = d$

Mali promjer navoja – vijka $d_1 = d - 2H_1$
– matice $D_1 = D - 2H_2$

Srednji promjer $d_2 = d + 1{,}050\,14\,P - H$
$= D_1 - 0{,}913\,96\,P + H$

Presjek jezgre $A = d_1^2\pi/4$

Viševojni pilasti navoji

Korak navoja P n-vojnih pilastih navoja veći je n-puta od koraka jednovojnog navoja, dok sve druge mjere navoja ostaju nepromijenjene.

*

Pilasti navoj upotrebljavamo za vretena koja mnogo rade, a prenose velike sile, ali samo u jednom smislu.

Razlikujemo tri prednosna stupnja pilastog navoja: prvi je za običajnu upotrebu, drugi za posebne slučajeve, a treći još samo u starim konstrukcijama.

Pilasti navoji prve prednosti

Oznaka*	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	D mm	D_1 mm	A mm²
S 10 × 2	2	10	6,528	8,636	10	7	33,5
S 12 × 2	2	12	8,528	10,636	12	9	57,1
S 12 × 3	3	12	6,794	9,954	12	7,5	36,3
S 16 × 2	2	16	12,528	14,636	16	13	123
S 16 × 4	4	16	9,058	13,272	16	10	64,4
S 20 × 2	2	20	16,528	18,636	20	17	215
S 20 × 4	4	20	13,058	17,272	20	14	134
S 24 × 3	3	24	18,794	21,954	24	19,5	277
S 24 × 5	5	24	15,322	20,590	24	16,5	184
S 24 × 8	8	24	10,116	18,545	24	12	80,4
S 28 × 3	3	28	22,794	25,954	28	23,5	408
S 28 × 5	5	28	19,322	24,590	28	20,5	293
S 28 × 8	8	28	14,116	22,545	28	16	156
S 32 × 3	3	32	26,794	29,954	32	27,5	564
S 32 × 6	6	32	21,586	27,909	32	23	370
S 32 × 10	10	32	14,644	25,181	32	17	168
S 36 × 3	3	36	30,794	33,954	36	31,5	745
S 36 × 6	6	36	25,586	31,909	36	27	514
S 36 × 10	10	36	18,644	29,181	36	21	273
S 40 × 3	3	40	34,794	37,954	40	35,5	951
S 40 × 7	7	40	27,852	35,227	40	29,5	609
S 40 × 10	10	40	22,644	33,181	40	25	403
S 44 × 3	3	44	38,794	41,954	44	39,5	1 182
S 44 × 7	7	44	31,852	39,227	44	33,5	797
S 44 × 12	12	44	23,174	35,817	44	26	422
S 48 × 3	3	48	42,794	45,954	48	43,5	1 438
S 48 × 8	8	48	34,116	42,545	48	36	914
S 48 × 12	12	48	27,174	39,817	48	30	580
S 52 × 3	3	52	46,794	49,954	52	47,5	1 720
S 52 × 8	8	52	38,116	46,545	52	40	1 141
S 52 × 12	12	52	31,174	43,817	52	34	763
S 60 × 3	3	60	54,794	57,954	60	55,5	2 358
S 60 × 9	9	60	44,380	53,863	60	46,5	1 547
S 60 × 14	14	60	35,702	50,453	60	39	1 001
S 70 × 4	4	70	63,058	67,272	70	64	3 123
S 70 × 10	10	70	52,644	63,181	70	55	2 177
S 70 × 16	16	70	42,232	59,089	70	46	1 401

* Upotrebljavati treba u prvom redu debelo označene navoje

Pilasti navoji prve prednosti (nastavak)

Oznaka*	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	D mm	D_1 mm	A mm²
S 80 × 4	4	80	73,058	77,272	80	74	4 192
S 80 × 10	10	80	62,644	73,181	80	65	3 082
S 80 × 16	16	80	52,232	69,089	80	56	2 143
S 90 × 4	4	90	83,058	87,272	90	84	5 418
S 90 × 12	12	90	69,174	81,817	90	72	3 758
S 90 × 18	18	90	58,760	77,726	90	63	2 712
S 100 × 4	4	100	93,058	97,272	100	94	6 801
S 100 × 12	12	100	79,174	91,817	100	82	4 923
S 100 × 20	20	100	65,290	86,362	100	70	3 348
S 120 × 6	6	120	109,586	115,909	120	111	9 432
S 120 × 14	14	120	95,702	110,453	120	99	7 193
S 120 × 22	22	120	81,818	104,998	120	87	5 258
S 140 × 6	6	140	129,586	135,909	140	131	13 189
S 140 × 14	14	140	115,702	130,453	140	119	10 514
S 140 × 24	24	140	98,348	123,634	140	104	7 597
S 160 × 6	6	160	149,586	155,909	160	151	17 574
S 160 × 16	16	160	132,232	149,089	160	136	13 733
S 160 × 28	28	160	111,404	140,907	160	118	9 747
S 180 × 8	8	180	166,116	174,545	180	168	21 673
S 180 × 18	18	180	148,760	167,726	180	153	17 381
S 180 × 28	28	180	131,404	160,907	180	138	13 562
S 200 × 8	8	200	186,116	194,545	200	188	27 206
S 200 × 18	18	200	168,760	187,726	200	173	22 368
S 200 × 32	32	200	144,462	178,179	200	152	16 391
S 220 × 8	8	220	206,116	214,545	220	208	33 367
S 220 × 20	20	220	185,290	206,362	220	190	26 965
S 220 × 36	36	220	157,520	195,451	220	166	19 488
S 240 × 8	8	240	226,116	234,545	240	228	40 156
S 240 × 22	22	240	201,818	224,998	240	207	31 990
S 240 × 36	36	240	177,520	215,451	240	186	24 751
S 260 × 12	12	260	239,174	251,817	260	242	44 928
S 260 × 22	22	260	221,818	244,998	260	227	38 644
S 260 × 40	40	260	190,578	232,724	260	200	28 526
S 280 × 12	12	280	259,174	271,817	280	262	52 756
S 280 × 24	24	280	238,348	263,634	280	244	44 618
S 280 × 40	40	280	210,578	252,724	280	220	34 827
S 300 × 12	12	300	279,174	291,817	300	282	61 213
S 300 × 24	24	300	258,348	283,634	300	264	52 420
S 300 × 44	44	300	223,636	269,996	300	234	39 280

* Upotrebljavati treba u prvom redu debelo označene navoje

Pilasti navoji prve prednosti

Oznaka	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	D mm	D_1 mm	A mm²
S 340 × 12	12	340	319,174	331,817	340	322	80010
S 340 × 44	44	340	263,636	309,996	340	274	54588
S 380 × 12	12	380	359,174	371,817	380	362	101321
S 420 × 18	18	420	388,760	407,726	420	393	118701
S 460 × 18	18	460	428,760	447,726	460	433	144384
S 500 × 18	18	500	468,760	487,726	500	473	172580
S 540 × 24	24	540	498,348	523,634	540	504	195053
S 580 × 24	24	580	538,348	563,634	580	544	227622
S 620 × 24	24	620	578,348	603,634	620	584	262704

*Pilasti navoji druge prednosti**

S 14 × 2	S 38 × 3	S 75 × 4	S 170 × 6	S 290 × 12
S 14 × 3	**S 38 × 7**	**S 75 × 10**	**S 170 × 16**	**S 290 × 24**
	S 38 × 10	S 75 × 16	S 170 × 28	S 290 × 44
S 18 × 2	S 42 × 3	S 85 × 4	S 190 × 8	S 320 × 12
S 18 × 4	**S 42 × 7**	**S 85 × 12**	**S 190 × 18**	
	S 42 × 10	S 85 × 18	S 190 × 32	S 320 × 44
S 22 × 3	S 46 × 3	S 95 × 4	S 210 × 8	S 360 × 12
S 22 × 5	**S 46 × 8**	**S 95 × 12**	**S 210 × 20**	
S 22 × 8	S 46 × 12	S 95 × 18	S 210 × 36	S 400 × 12
S 26 × 3	S 50 × 3	S 110 × 4	S 230 × 8	S 440 × 18
S 26 × 5	**S 50 × 8**	**S 110 × 12**	**S 230 × 20**	
S 26 × 8	S 50 × 12	S 110 × 20	S 230 × 36	S 480 × 18
S 30 × 3	S 55 × 3	S 130 × 6	S 250 × 12	S 520 × 24
S 30 × 6	**S 55 × 9**	**S 130 × 14**	**S 250 × 22**	
S 30 × 10	S 50 × 14	S 130 × 22	S 250 × 40	S 560 × 24
S 34 × 3	S 65 × 4	S 150 × 6	S 270 × 12	S 600 × 24
S 34 × 6	**S 65 × 10**	**S 150 × 16**	**S 270 × 24**	
S 34 × 10	S 65 × 16	S 150 × 24	S 270 × 40	S 640 × 24

*Pilasti navoji treće prednosti**

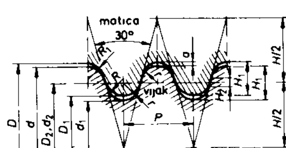
S 105 × 4	S 125 × 6	S 145 × 6	S 165 × 6	S 185 × 8
S 105 × 12	**S 125 × 14**	**S 145 × 14**	**S 165 × 16**	**S 185 × 18**
S 105 × 20	S 125 × 22	S 145 × 24	S 165 × 28	S 185 × 32
S 115 × 6	S 135 × 6	S 155 × 6	S 175 × 8	S 195 × 8
S 115 × 14	**S 135 × 14**	**S 155 × 16**	**S 175 × 16**	**S 195 × 18**
S 115 × 22	S 135 × 24	S 155 × 24	S 175 × 28	S 195 × 32

* Upotrebljavati treba u prvom redu debelo označene navoje

Obli navoji

(JUS M.B0.081 — 1952)

Profil oblih navoja



Broj navoja na 25,4 mm	n
Korak navoja (mm)	$P = 25{,}4/n$
Teoretska dubina navoja	$H = 1{,}866\,03\,P$
Dubina navoja vijka i matice	$H_1 = 0{,}5\,P$
Nosiva dubina navoja	$H_2 = 0{,}083\,50\,P$
Zračnost	$a = 0{,}05\,P$
Zaobljenost — vijka	$r = 0{,}238\,51\,P$
— matice	$R = 0{,}255\,97\,P$
	$R_1 = 0{,}221\,05\,P$

Mjere profila oblog navoja (mm)

n	P mm	H_1 mm	H_2 mm	r mm	R mm	R_1 mm	a mm
10	2,540	1,270	0,212	0,606	0,650	0,561	0,127 00
8	3,175	1,588	0,265	0,757	0,813	0,702	0,158 75
6	4,233	2,117	0,353	1,010	1,084	0,936	0,211 65
4	6,350	3,175	0,530	1,515	1,625	1,404	0,317 50

Veliki promjer navoja — vijka	d
— matice	$D = d + 2a$
Mali promjer navoja — vijka	$d_1 = d - 2H_1$
— matice	$D_1 = D - 2H_1$
Srednji promjer	$d_2 = d - H_1 = d_1 + H_1$
Presjek jezgre	$A = d_1^2\pi/4$

Obli normalni navoji (JUS M.B0.081 — 1952)

Oznaka	n	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	D mm	D_1 mm	A mm²
Rd 8 × 1/10	10	2,540	8	5,460	6,730	8,254	5,714	23,4
Rd 9 × 1/10	10	2,540	9	6,460	7,730	9,254	6,714	32,8
Rd 10 × 1/10	10	2,540	10	7,460	8,730	10,254	7,714	43,7
Rd 11 × 1/10	10	2,540	11	8,460	9,730	11,254	8,714	56,2
Rd 12 × 1/10	10	2,540	12	9,460	10,730	12,254	9,714	70,3
Rd 14 × 1/8	8	3,175	14	10,825	12,412	14,318	11,142	92,0
Rd 16 × 1/8	8	3,175	16	12,825	14,412	16,318	13,142	129
Rd 18 × 1/8	8	3,175	18	14,825	16,412	18,318	15,142	172
Rd 20 × 1/8	8	3,175	20	16,825	18,412	20,318	17,142	222
Rd 22 × 1/8	8	3,175	22	18,825	20,412	22,318	19,142	278
Rd 24 × 1/8	8	3,175	24	20,825	22,412	24,318	21,142	340
Rd 26 × 1/8	8	3,175	26	22,825	24,412	26,318	23,142	409
Rd 28 × 1/8	8	3,175	28	24,825	26,412	28,318	25,142	484
Rd 30 × 1/8	8	3,175	30	26,825	28,412	30,318	27,142	565
Rd 32 × 1/8	8	3,175	32	28,825	30,412	32,318	29,142	652
Rd 36 × 1/8	8	3,175	36	32,825	34,412	36,318	33,142	846
Rd 40 × 1/6	6	4,233	40	35,767	37,883	40,423	36,190	1 005
Rd 44 × 1/6	6	4,233	44	39,767	41,883	44,423	40,190	1 242
Rd 48 × 1/6	6	4,233	48	43,767	45,883	48,423	44,190	1 505
Rd 52 × 1/6	6	4,233	52	47,767	49,883	52,423	48,190	1 792

Obli normalni navoji (nastavak)

Oznaka	n	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	D mm	D_1 mm	A mm²
Rd 55 × 1/6	6	4,233	55	50,767	52,883	55,423	51,190	2 024
Rd 60 × 1/6	6	4,233	60	55,767	57,883	60,423	56,190	2 443
Rd 65 × 1/6	6	4,233	65	60,767	62,883	65,423	61,190	2 900
Rd 70 × 1/6	6	4,233	70	65,767	67,883	70,423	66,190	3 397
Rd 75 × 1/6	6	4,233	75	70,767	72,883	75,423	71,190	3 933
Rd 80 × 1/6	6	4,233	80	75,767	77,883	80,423	76,190	4 509
Rd 85 × 1/6	6	4,233	85	80,767	82,883	85,423	81,190	5 123
Rd 90 × 1/6	6	4,233	90	85,767	87,883	90,423	86,190	5 777
Rd 95 × 1/6	6	4,233	95	90,767	92,883	95,423	91,190	6 471
Rd 100 × 1/6	6	4,233	100	95,767	97,883	100,423	96,190	7 203
Rd 110 × 1/4	4	6,350	110	103,650	106,825	110,635	104,285	8 438
Rd 120 × 1/4	4	6,350	120	113,650	116,825	120,635	114,285	10 145
Rd 130 × 1/4	4	6,350	130	123,650	126,825	130,635	124,285	12 008
Rd 140 × 1/4	4	6,350	140	133,650	136,825	140,635	134,285	14 029
Rd 150 × 1/4	4	6,350	150	143,650	146,825	150,635	144,285	16 207
Rd 160 × 1/4	4	6,350	160	153,650	156,825	160,635	154,285	18 542
Rd 170 × 1/4	4	6,350	170	163,650	166,825	170,635	164,285	21 034
Rd 180 × 1/4	4	6,350	180	173,650	176,825	180,635	174,285	23 683
Rd 190 × 1/4	4	6,350	190	183,650	186,825	190,635	184,285	26 489
Rd 200 × 1/4	4	6,350	200	193,650	196,825	200,635	194,285	29 453

Obli grubi navoj za željeznička vozila (JUS M.B0.082 — 1952)

Profil se toga navoja razlikuje od profila normalnoga oblog navoja time što mu kut nosivih površina teoretskog profila iznosi 15° 56′.

Dimenzije grubog oblog navoja:

$P = 7$ mm, $H_1 = 4{,}5$ mm, $r = 1{,}65$ mm, $R = 1{,}55$ mm, $R_1 = 1{,}75$ mm

Oznaka	d mm	d_1 mm	d_2 mm	D mm	D_1 mm	D_2 mm	A mm²
Rd 34 × 7	34	25	29,5	34,4	25,4	31,143	491
Rd 39 × 7	39	30	34,5	39,4	30,4	36,143	707
Rd 44 × 7	44	35	39,5	44,4	35,4	41,143	962
Rd 49 × 7	49	40	44,5	49,4	40,4	46,143	1 256
Rd 54 × 7	54	45	49,5	54,4	45,4	51,143	1 590
Rd 59 × 7	59	50	54,5	59,4	50,4	56,143	1 963
Rd 64 × 7	64	55	59,5	64,4	55,4	61,143	2 376
Rd 69 × 7	69	60	64,5	69,4	60,4	66,143	2 827
Rd 74 × 7	74	65	69,5	74,4	65,4	71,143	3 318
Rd 79 × 7	79	70	74,5	79,4	70,4	76,143	3 848

Obli navoj za željezničke spojke (JUS M.B0.083 — 1952)

Profil toga navoja u principu je isti kao u normalnoga oblog navoja s promjerom vijka 50 mm i korakom navoja 7 mm:

Oznaka: Rd 50 × 7 (odn. Rd 50 × 7 lijevi)

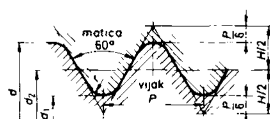
Dimenzije:

$P = 7$ mm	$r = 1{,}67$ mm	$d = 50$ mm	$D = 50{,}6$ mm
$H_1 = 3{,}5$ mm	$R = 1{,}635$ mm	$d_1 = 43$ mm	$D_1 = 43{,}6$ mm
$H_2 = 0{,}75$ mm	$R_1 = 1{,}704$ mm	$d_2 = 46{,}5$ mm	$D_2 = 47{,}3$ mm

(D_2 je srednji promjer matice.)

Navoji za bicikle (JUS M.B0.95 — 1957)

Profil navoja

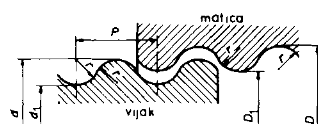


Broj navoja na 25,4 mm n
Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$
Dubina navoja $H_1 = 0{,}5327\,P$
Zaobljenost $r = P/6$
Veliki promjer d
Srednji promjer $d_2 = d - H_1$
Mali promjer $d_1 = d - 2H_1$

Oznaka	d mm	n	P mm	H_1 mm	r mm	d_2 mm	d_1 mm
Bi 3/8	9,525	26	0,977	0,520	0,163	9,004	8,484
Bi 0,415	10,550	26	0,977	0,520	0,163	10,029	9,509
Bi 9/16	14,288	20	1,270	0,677	0,212	13,611	12,934
Bi 1,29	32,766	24	1,058	0,564	0,176	32,202	31,638
Bi 1,37	34,798	24	1,058	0,564	0,176	34,234	33,670

Edisonovi navoji (JUS M.B0.086 — 1952)

Profil navoja



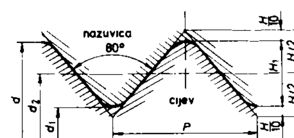
Broj navoja na 25,4 mm n
Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$
Zaobljenost r
Veliki promjer vijka d
Mali promjer vijka d_1
Veliki promjer matice D
Mali promjer matice D_1

Oznaka	n	P mm	r mm	d* mm	d_1* mm	D* mm	D_1* mm
E 10	14	1,814	0,531	9,53 9,36	8,51 8,34	9,78 9,61	8,76 8,59
E 14	9	2,822	0,822	13,89 13,70	12,29 12,10	14,16 13,97	12,56 12,37
E 27	7	3,629	1,025	26,45 26,15	24,26 23,96	26,85 26,55	24,66 24,36
E 33	6	4,233	1,187	33,05 32,65	30,45 30,05	33,55 33,15	30,95 30,55
E 40	4	6,350	1,850	39,50 39,05	35,90 35,45	40,05 39,60	36,45 36,00

* Gornji i donji brojevi označuju granične vrijednosti.

Navoji za oklopne cijevi
(JUS M.B0.090 — 1952)

Profil navoja



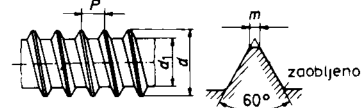
Broj navoja na 25,4 mm n
Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$
Teoretska dubina navoja $H = 0{,}595\,875\,P$
Stvarna dubina navoja $H_1 = 0{,}4767\,P$
Zaobljenost $r = 0{,}107\,P$
Veliki promjer navoja d
Mali promjer navoja $d_1 = d - 2H_1$
Srednji promjer navoja $d_2 = d - H_1$

Oznaka	n	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	H_1 mm	r mm
Re 7	20	1,27	12,50	11,28	11,89	0,61	0,14
Re 9	18	1,41	15,20	13,86	14,53	0,67	0,15
Re 11	18	1,41	18,60	17,26	17,93	0,67	0,15
Re 13,5	18	1,41	20,40	19,06	19,73	0,67	0,15
Re 16	18	1,41	22,50	21,16	21,83	0,67	0,15
Re 21	16	1,588	28,30	26,78	27,54	0,76	0,17
Re 29	16	1,588	37,00	35,48	36,24	0,76	0,17
Re 36	16	1,588	47,00	45,48	46,24	0,76	0,17
Re 42	16	1,588	54,00	52,48	53,24	0,76	0,17
Re 48	16	1,588	59,30	57,78	58,54	0,76	0,17

Navoji samoreznih vijaka
(JUS M.B0.100 - 1983)

Profil navoja

Veliki promjer d
Mali promjer d_1
Korak navoja P
Širina vrha navoja m



Oznaka	d mm	d_1 mm	P mm	m mm	Oznaka	d mm	d_1 mm	P mm	m mm
Nl 2,2	2,2	1,6	0,79	0,1	Nl 4,8	4,8	3,6	1,59	0,15
Nl 2,9	2,9	2,2	1,06	0,1	Nl 5,5	5,5	4,2	1,81	0,15
Nl 3,5	3,5	2,6	1,27	0,1	Nl 6,3	6,3	4,9	1,81	0,15
Nl 3,9	3,9	2,9	1,34	0,1	Nl 8	8	6,2	2,12	0,15
Nl 4,2	4,2	3,1	1,41	0,1	Nl 9,6	9,6	7,8	2,12	0,15

DOPUŠTENA NAPREZANJA

U konstrukcijama se ne smiju pojaviti trajne plastične deformacije, već mora sva konstrukcija stalno ostati u području elastičnih deformacija. To znači, da dopuštena naprezanja u materijalu ne smiju prijeći granicu elastičnosti. No, zbog sigurnosti (u slučaju pojavljivanja nepredviđenih dodatnih opterećenja, npr. dinamičkih) materijal nećemo naprezati ni do granice elastičnosti. (Iznimke su posebni slučajevi, kada određenom plastičnom deformacijom postižemo djelomično ukrućivanje materijala.)

U praksi su uvedena d o p u š t e n a n a p r e z a n j a, određena koeficijentom sigurnosti v, tj. omjerom (vlačne) čvrstoće i dopuštenog naprezanja materijala. Taj se koeficijent mijenja – prema zahtijevanoj sigurnosti – od 2 do 10.

Dopušteno naprezanje $\sigma_{dop} = R_m/v$

Dopušteno naprezanje ovisi o osnovnim vrstama opterećenja pa razlikujemo dopuštena naprezanja:

na vlak	σ_{dop}
na tlak	$-\sigma_{dop}$
na savijanje	$\sigma_{f\,dop}$
na smik (tangencijalno)	$\tau_{s\,dop}$
na torziju (uvijanje)	$\tau_{t\,dop}$

Dopušteno naprezanje, dakako, veoma ovisi i o posebnim faktorima koji utječu na čvrstoću materijala, napose o koeficijentu oblika te o trajnom (statičkom i dinamičkom) opterećenju (str. 537 do 542).

Za određivanje dopuštenog naprezanja posebno je važno stanje materijala. Zdrav materijal mora biti homogen i ne smije imati unutarnjih grešaka (šupljina, mjehura, nakupina itd.), koje smanjuju nosive presjeke i mogu izazvati znatna zarezna naprezanja.

Osim toga, treba pri određivanju dopuštenog naprezanja uzeti u obzir još i druge okolnosti koje utječu na čvrstoću, kao što je na primjer smanjenje presjeka zbog gubitka materijala pri habanju, koroziji itd.

Za proračunavanje konstrukcijskih dijelova jednostavnih i iskušanih oblika, na koje djeluju potpuno poznata opterećenja, možemo upotrijebiti dopušteno naprezanje koje je iskustvom određeno za slične slučajeve. Tako postupamo u praksi pri proračunu jednostavnih strojnih elemenata uzimajući dopuštena naprezanja prema iskustvu (sabrana u tablicama na str. 533 do 535). Pri proračunu čeličnih konstrukcija uzimamo za njih posebna dopuštena naprezanja (vidi tablicu na str. 536).

Međutim, za sve novo oblikovane konstrukcijske dijelove, napose za komplicirane oblike i opterećenja, takav način proračunavanja nije više dovoljan. U takvim slučajevima treba čvrstoću i dopuštena naprezanja odrediti posebnim studioznim proračunima i ispitivanjima.

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih materijala

U slijedećim tablicama znače:

$R_{p\,0,2}$	– (dogovorno) naprezanje tečenja
R_m	– čvrstoću na vlak,
σ_{Df}	– trajnu dinamičku čvrstoću za savijanje (slučaj III),
σ_{dop}	– dopušteno naprezanje na tlak, i to:
I	– pri mirnom opterećenju,
II	– pri kolebanju opterećenja između maksimalne vrijednosti i nule,
III	– pri kolebanju opterećenja između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti.

Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okoline.

Oznaka po JUS	$R_{p\,0,2}$	R_m	σ_{Df}	σ_{dop} I	σ_{dop} II	σ_{dop} III
	N/mm²					
Sivi lijev (JUS C.J2.020 – 1973) – neobrađen						
SL 15	–	110.. 180	60...80	40...55	30...45	25...30
SL 20	–	160...230	75...110	55...70	45...60	25...40
SL 25	–	210...280	100...140	80...100	60...80	40...60
SL 30	–	250...300	110...160	80...110	65...90	40...70
Temperovani lijev (JUS C.J2.021 – 1958)						
BTeL 35	–	320...360	110...140	80...110	50...80	40...50
BTeL 40	200...240	380...410	130...170	90...120	60...90	45...60
CTeL 35	–	350...380	80...110	70...85	40...60	30...40
CTeL 38	200...240	380...400	100...130	80...100	50...75	35...50
Čelični lijev (JUS C.J3.011 – 1973) – normalno žaren						
ČL. 0300	180...230	380...450	160...190	100...130	80...110	50...75
ČL. 0400	220...280	450...520	180...220	110...160	90...120	60...85
ČL. 0500	250...320	520...600	200...240	130...180	100...130	70...95
ČL. 0600	280...360	600...700	220...260	140...200	110...150	80...110
Opći konstrukcijski čelici (JUS C.B0.500 – 1970 i 1972) – normalno žareni						
Č. 0261	200...230	340...420	160...200	110...130	90...120	75...95
Č. 0361	220...250	370...450	170...200	120...140	100...130	80...100
Č. 0461	240...280	420...500	190...250	130...150	110...140	90...110
Č. 0561	340...420	520...620	300...350	180...210	140...180	110...150
Č. 0545	280...340	500...600	220...270	150...180	120...160	95...120
Č. 0645	320...380	600...720	280...330	180...210	150...185	105...140
Č. 0745	340...420	700...850	300...380	210...250	160...200	115...170

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih materijala (nastavak)

Značenje oznaka naprezanja – vidi str. 533

Oznaka po JUS	$R_{p0,2}$	R_m	σ_{Df}	σ_{dop} I	σ_{dop} II	σ_{dop} III
	N/mm²					
***Čelici za cementiranje* (JUS C.B9.020 – 1974) – nakon kaljenja (Podaci vrijede za svojstva jezgre pri debljini ispitnog uzorka 15 do 40 mm)**						
Č. 1120, Č. 1121	250... 300	420... 520	220...280	110...150	90...120	70... 90
Č. 1220, Č. 1221	300... 360	500... 650	250...300	140...170	120...150	90...110
Č. 4120	400... 600	600... 850	300...360	200...260	140...200	120...170
Č. 4320	600... 800	800...1100	320...400	300...360	230...320	150...220
Č. 4321	700... 950	1000...1300	350...420	320...420	260...360	180...240
Č. 4721	750... 950	1100...1450	360...460	320...420	250...350	160...250
Č. 5420	650... 800	900...1200	320...420	300...380	240...330	160...230
Č. 5421	800...1000	1200...1450	400...480	340...440	270...370	190...260
***Čelici za poboljšanje* (JUS C.B9.021 – 1974) – poboljšani**						
Č. 1330, Č. 1331	300... 380	500... 650	220...270	140...170	120...150	90...115
Č. 1430, Č. 1431	330... 450	550... 800	270...320	170...200	130...170	100...125
Č. 1530, Č. 1531	360... 500	600... 850	300...340	190...220	150...200	110...150
Č. 1730, Č. 1731	440... 600	700...1000	340...400	220...260	170...240	130...170
Č. 3130	500... 650	750...1000	360...480	260...330	200...260	160...230
Č. 4130	550... 800	800...1050	400...500	280...350	220...280	180...250
Č. 4131	550... 800	800...1100	400...500	300...360	230...290	200...250
Č. 4730	450... 700	700...1050	320...400	210...270	150...200	130...180
Č. 4731	550... 800	800...1100	380...480	260...330	200...250	170...230
Č. 4732	650... 900	950...1200	460...550	300...380	230...280	200...260
Č. 4733	700... 950	1000...1350	500...580	320...380	230...280	210...260
Č. 4734	800...1100	1100...1450	520...650	320...400	240...300	220...280
Č. 4830	650... 950	500...1250	450...580	310...380	250...300	200...270
Č. 5430	650... 900	950...1200	480...580	300...380	230...280	200...260
Č. 5431	700... 950	1000...1350	500...600	320...380	240...280	210...260
Č. 5432	800...1100	1100...1450	520...620	320...400	250...300	220...280

Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okoline.

Oznaka po JUS*		$R_{p0.2}$	R_m	σ_{Df}	σ_{dop} I	σ_{dop} II	σ_{dop} III
		N/mm²					
***Čelici za opruge* (JUS C.B0.551 – 1984) – poboljšani**							
Č. 2133		1100...1400	1300...1500	550...650	720...880	420...500	300...380
Č. 4830		1200...1600	1350...1700	580...700	750...900	420...520	320...400
***Aluminijske slitine za lijevanje* (JUS C.C2.300 – 1983**							
Al Si 12.01		70... 90	140...200	60... 90	40...70	30...60	20...40
Al Si 12.02		90...110	150...200	70...100	40...70	30...60	20...40
Al Si 6 Cu4.01		100...150	160...200	60... 90	40...70	30...60	20...40
Al Si 6 Cu4.02		110...160	170...220	70...100	40...70	30...60	20...40
Al Mg 5 Si.01		90...100	170...250	60... 80	40...70	30...60	20...40
***Aluminijske slitine za gnječenje* (JUS C.C2.100 – 1967)**							
Al Cu4 Si Mg	m	80...140	180...220	80...120	50... 90	40...60	30...40
	u	220...320	280...450	120...180	90...130	60...90	50...70
Al Si1 Mg	m	50... 80	110...150	50... 70	30... 50	20...40	20...30
	u	150...210	170...290	70...130	60...110	40...70	30...60
Al Mg2	m	70...120	180...220	70...120	50... 80	30...60	30...50
	h	140...180	230...260	100...170	70...110	50...70	40...60
***Čisti bakar* (JUS C.D1.002 – 1972)**							
Cu – ljevan		70...120	140...200	40... 50	30... 40	20...30	10...20
– žaren		40... 80	200...250	80...110	30... 40	30...50	20...40
– vučen		300...400	380...440	100...120	90...120	40...60	20...40
***Bakrene slitine za lijevanje* (JUS C.D2.300/301 – 1982)**							
P.CuZn33Pb2.01		60... 80	150...200	50... 70	20...40	20...30	20
K.CuZn40Pb.02		80...150	250...350	70...100	30...50	20...40	20...30
***Bakrene slitine za gnječenje* (JUS C.D2.100/101/102 – 1982)**							
CuZn39Pb2	m	100...150	370...480	130...170	80... 90	60... 80	50...60
	t	120...160	510...610	180...220	120...150	90...110	70...80
CuZn28	m	70...100	250...300	90...120	50... 60	40... 50	30...40
	t	210...260	380...460	140...180	100...130	70... 90	50...60
CuZn10	m	70...100	240...290	80...120	50... 60	40... 60	30...50
	t	220...280	350...430	140...180	110...140	70... 90	50 ..70
CuSn6		–	360...420	120...150	90...120	70... 90	50...70

* Posebne oznake znače: m – meko, t – tvrdo, u – očvrsnuto, h – hladno očvrsnuto.

Dopušteno naprezanje za čelične konstrukcije

Dopušteno naprezanje za kovinske dijelove

Sestavni dio konstrukcije		Dopuštena naprezanja na vlak σ_{dop} a	b	tlak $-\sigma_{dop}$ a	b	smik τ_{dop} a	b	Bočni pritisak* p a	b
		N/mm²							
Nosači	od Č.0000	120	120	120	120	96	96		
	Č.0370	140	160	140	160	112	128		
Zakovice	od Č.0246								
u nosačima	od Č.0000					120	120	240	240
	od Č.0370					140	160	280	320
Vijci	od Č.0246								
u nosačima	od Č.0000	85	85			96	96	240	240
	Č.0370	100	110			112	128	280	320
Temeljni	od Č.0000	85	85						
vijci	Č.0370	100	110						
Dijelovi	od Č.1430	200	220	200	220			950	1200
ležaja	ČL.0501	180	200	180	200			850	1000
i zglobova	SL.15	45	50	100	110			500	600

* Pod »bočnim pritiskom« podrazumijevamo pritisak zakovice ili vijka na dosjednu površinu provrta (rupe).

Vrijednosti u tablici vrijede pri temperaturi okoline 20°C, i to:

a) za opterećenje glavnim silama: vlastitom težinom, korisnom težinom težinom snijega;

b) za opterećenje koje se ne sastoji samo od glavnih sila (kao pod a), već i od dodatnih: sile vjetra, kočne sile, horizontalnih bočnih sila, sile zbog temperaturnog rastezanja.

Odlučan je onaj proračun opterećenja koji daje veće nosive presjeke.

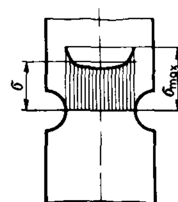
*

Dopušteno naprezanje za nekovinske materijale

Materijal		Modul elastičnosti E	Dopuštena naprezanja na vlak σ_{dop}	tlak $-\sigma_{dop}$	savij. $\sigma_{f\,dop}$	smik $\tau_{s\,dop}$
		N/mm²				
Drvo						
hrast, bukva	∥	14000	10,5	7...12	8...14	1
	⊥	1000	0,5	3	–	2,5
crnogorica	∥	11000	9	6...11	7...13	0,9
	⊥	550	0,3	2	–	1
Beton						
nearmiran		14000...36000	–	1,5...8	–	–

Utjecaj oblika predmeta

Kod predmeta, kojima se presjek znatno mijenja, nije razdioba naprezanja više jednolika po cijelom presjeku, već se na mjestima gdje se presjek mijenja (osobito kod naglih prijelaza), javlja znatno veće naprezanje σ_{max} koje može biti nekoliko puta veće od nazivnog naprezanja σ, koje zamišljamo da je jednoliko raspodijeljeno po cjelokupnom presjeku.

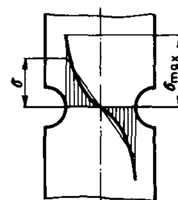


Razdioba naprezanja pri vlaku

»Koeficijent oblika« α_k

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = 1\ldots3(\ldots10)$$

Koeficijent oblika α_k praktički ovisi samo o načinu opterećenja i vanjskom obliku predmeta, a osobito o dubini zareza i zakrivljenosti njegova tjemena, dakle općenito o oštrini zareza. U običnim slučajevima koeficijent oblika dostiže vrijednost 3, a u posebnim slučajevima i do 10.



Razdioba naprezanja pri savijanju

Veliki porast naprezanja zbog oblika doveo je nužno do opsežnih sistematskih ispitivanja »zarezne čvrstoće«.

Koeficijenti oblika α_k za najobičnije slučajeve

Oblik zareza	Vrsta opterećenja	Nazivno naprezanje	$\frac{r}{D}$	Koeficijent oblika α_k za h/D = 0,025	0,05	0,1	0,2
	vlak	$\frac{4F}{\pi(D-2h)^2}$	0,01	2,1	2,4	2,6	2,64
			0,05	1,55	1,85	1,95	1,9
			0,1	1,38	1,55	1,7	1;58
			0,2	1,26	1,35	1,45	1,4
	savijanje	$\frac{32\,M_t}{\pi(D-2h)^3}$	0,01	2,0	2,22	2,3	2,2
			0,05	1,5	1,7	1,78	1,65
			0,1	1,32	1,43	1,48	1,42
			0,2	1,23	1,25	1,3	1,3
	torzija	$\frac{16\,T}{\pi(D-2h)^3}$	0,01	1,5	1,6	1,65	1,65
			0,05	1,22	1,35	1,4	1,3
			0,1	1,13	1,2	1,3	1,2
			0,2	1,1	1,13	1,12	1,1

Koeficijenti oblika α_k za najobičnije slučajeve (nastavak)

Oblika zareza	Vrsta optere-ćenja	Nazivno naprezanje	$\frac{r}{a}$	Koeficijent oblika α_k za h/a = 0,025	0,05	0,1	0,2
	vlak	$\frac{F}{b(a-2h)}$	0,01	2,2	2,5	2,8	2,9
			0,05	1,65	1,95	2,1	2,15
			0,1	1,45	1,6	1,8	1,7
			0,2	1,35	1,45	1,55	1,5
	savija-nje	$\frac{6M_f}{b(a-2h)^2}$	0,01	2,05	2,3	2,5	2,3
			0,05	1,55	1,8	1,85	1,8
			0,1	1,4	1,5	1,5	1,45
			0,2	1,25	1,3	1,3	1,28
	vlak	$\frac{F}{b(a-h)}$	0,025	1,8	2,0	2,15	2,18
			0,05	1,55	1,8	1,88	1,88
			0,1	1,32	1,55	1,6	1,6
			0,2	1,23	1,28	1,4	1,4
	savija-nje	$\frac{6M_f}{b(a-h)^2}$	0,025	1,92	2,2	2,45	2,58
			0,05	1,6	1,95	2,15	2,25
			0,1	1,42	1,62	1,81	1,9
			0,2	1,31	1,43	1,52	1,6
	vlak	$\frac{F}{b(a-2h)}$	$=\frac{h}{a}$		2,15	2,1	2,03
	savija-nje	$\frac{3M_f h}{2b\left(\frac{a}{2}\right)^3-h^3}$	$=\frac{h}{a}$		1,58	1,62	1,64

Pri mirnom opterećenju većina žilavih materijala nije posebno osjetljiva na zarezna naprezanja, tako da vršna opterećenja često ne treba ni uzimati u obzir pa možemo računati s nazivnim naprezanjem, koje zamišljamo da je jednoliko raspodijeljeno po cijelom presjeku.

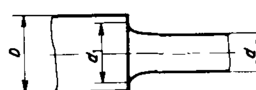
Osjetljivost čelika prema zareznom naprezanju je veća ako mu je granica plastičnosti viša, pa je tvrdi čelik mnogo osjetljiviji prema zarezima od mekoga.

Lijevano željezo praktički nije osjetljivo prema zareznim naprezanjima zbog svojih »unutarnjih zareza« (grafitni listići!).

Zarezna se osjetljivost jako povećava ako opterećenje nije mirno, kao što je to npr. pri djelovanju udaraca. U tom slučaju govorimo o »dinamičkoj ili udarnoj zareznoj čvrstoći«.

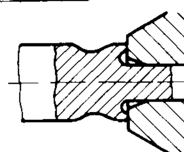
Općenito se pri promjenljivom opterećenju znatno povećava osjetljivost za zarezna naprezanja, što nužno traži dublje istraživanje i studij o razdiobi naprezanja.

Da smanjimo zarezno naprezanje σ_{max}, u konstrukcijama se dosljedno klonimo oštrih zareza i prijelaza pa izvodimo što je moguće postupnije prijelaze:



– postupni prijelaz (paraboličnog ili bar kružnog oblika) od promjera d do promjera d_1;

– rasterećeni prijelaz sa zaobljenom udubinom na predmetima gdje se ne može načiniti pristupni prijelaz.



Ne možemo li izbjeći oštri prijelaz, valja takvo mjesto pojačati većim dimenzijama ili upotrijebiti čvršći materijal, kako bismo uspješno spriječili zarezno djelovanje.

Utjecaj trajanja opterećenja

Pri opterećivanju do određenog naprezanja ne moraju se sve deformacije pojaviti odmah, već djelomice tek nakon dužeg vremena. Tu pojavu vremenskog zaostajanja deformacija iza opterećenja nazivamo puženjem materijala.

Puženje sprečavamo tako da materijal opteretimo manje nego je to dopušteno za kratkotrajno opterećenje. Čvrstoća materijala dakle ovisi o trajanju opterećenja pa je ona to manja što opterećenje duže traje. Svakom trajanju opterećenja odgovara određena čvrstoća materijala, a nazivamo je vremenskom statičkom čvrstoćom.

Pri stanovitom manjem opterećenju puženje može prestati. Odgovarajuću čvrstoću materijala koja više ne ovisi o trajanju opterećenja nazivamo trajnom statičkom čvrstoćom (vidi str. 320).

Utjecaj promjenljivog opterećenja

Čvrstoća materijala znatno opada ako opterećenje nije jednoliko, već se neprestano mijenja (koleba; titra). To kolebanje opterećenja uzrokuje i kolebanje naprezanja u materijalu.

Pri promjenljivom naprezanju čvrstoća se smanjuje s povećanjem broja titraja. Pri vrlo velikom broju titraja čvrstoća se približava vrijednosti pri kojoj više ne ovisi o broju titraja. Nazivamo je »dinamičkom čvrstoćom« (vidi str. 321).

Dinamička čvrstoća ovisi o tome kako se kolebaju naprezanja. Najčešće određujemo »pulzirajuću (titranju) dinamičku čvrstoću«, pri kolebanju naprezanja od 0 do neke vrijednosti vlaka ili tlaka, i »njihajnu (kolebljivu) dinamičku čvrstoću«, pri kolebanju naprezanja između apsolutno jednakih vrijednosti vlaka i tlaka.

Dijagrami dinamičke čvrstoće (Smithovi dijagrami, str. 321) za neke konstrukcijske čelike sabrani su na str. 540 do 542.

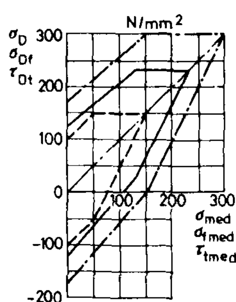
Dijagrami dinamičke čvrstoće

U dijagramima dinamičke čvrstoće nekih konstrukcijskih čelika označene krivulje predstavljaju

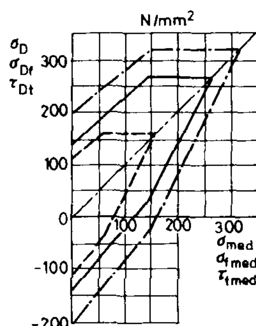
————————	σ_D za vlak i tlak
— · — · — · —	σ_{Df} za savijanje
— — — —	τ_{Dt} za torziju

i to ovisno o srednjim naprezanjima σ_{med}, $\sigma_{f\,med}$, $\tau_{t\,med}$.

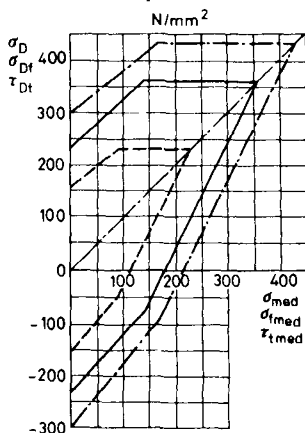
Sva su naprezanja u dijagramima dana u N/mm².



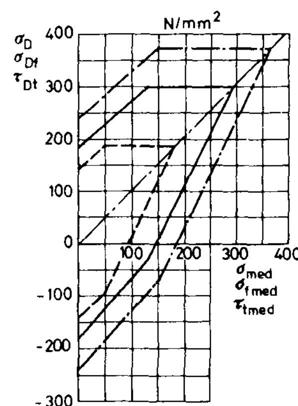
Obični konstrukcijski čelik Č. 0361



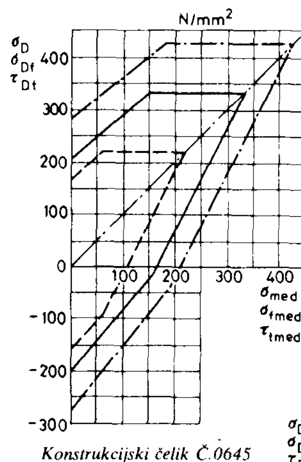
Obični konstrukcijski čelik Č. 0461



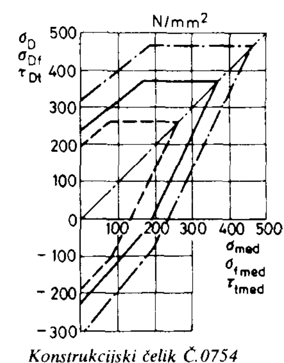
Obični konstrukcijski čelik Č. 0561



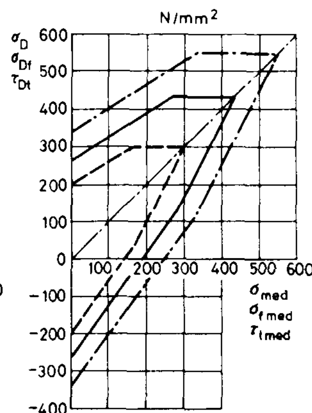
Konstrukcijski čelik Č. 0545



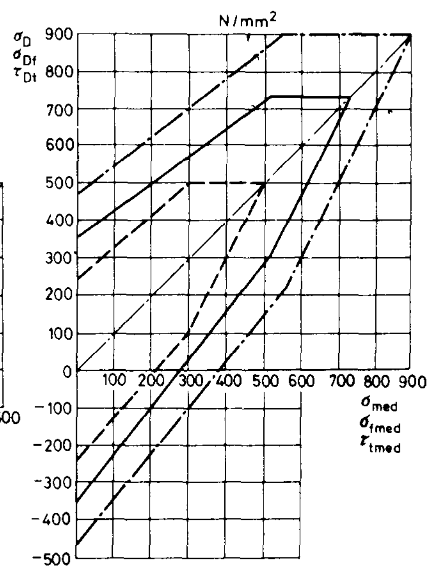
Konstrukcijski čelik Č.0645



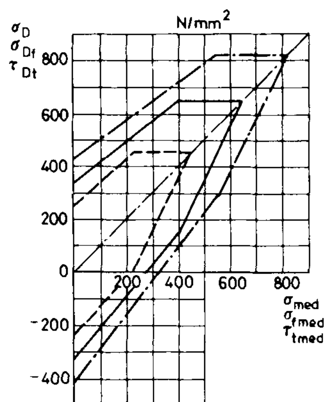
Konstrukcijski čelik Č.0754



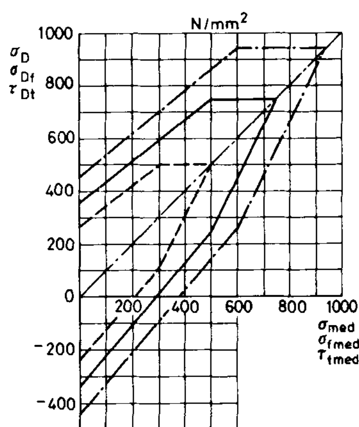
Nelegirani čelik za poboljšanje Č.1530



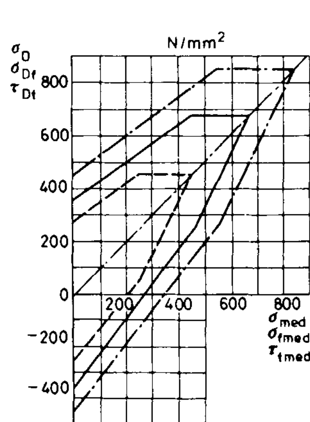
Malo legirani Mn-Si čelik za poboljšanje Č.3130



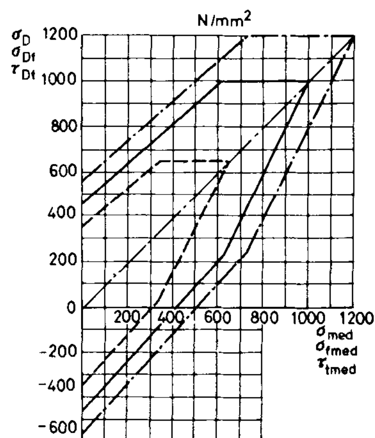
Legirani Cr-čelik za poboljšanje Č. 4130



Legirani Cr-V-čelik za poboljšanje Č. 4830



Legirani Cr-Mo-čelik za poboljšanje Č. 4731



Legirani Cr-Mo-V-čelik za poboljšanje Č. 4734

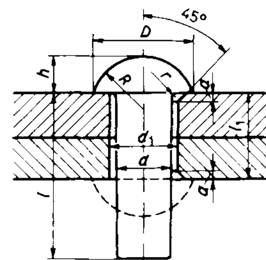
NERASTAVLJIVI SPOJEVI

Zakovični spojevi

Zakovice s poluokruglom glavom

– za čelične konstrukcije (JUS M.B3.021 – 1984), (lijevi dio slike),

– za kotlove pod tlakom (desni dio slike).



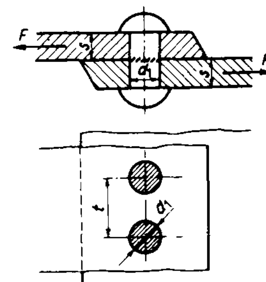
Nazivni promjer (sirove) zakovice d
Promjer zakovane zakovice d_1
Presjek zakovane zakovice $A = d_1{}^2\pi/4$

Dimenzije zakovica se vidi u donjoj tablici. Duljina sirove zakovice l ovisi o ukupnoj debljini limova l_1.

d mm	d_1 mm	Zakovice za čelične konstrukcije				Zakovice za kotlove pod tlakom					A mm²
		D mm	h mm	R mm	r mm	D mm	h mm	R mm	r mm	a mm	
10	11	16	6,5	8	0,4	18	7	9,5	1	1	95
13	14	21	8,5	11	0,6	23	9	12	1,5	1,5	154
16	17	26	10	13,5	0,8	30	12	15,5	2	2	227
19	20	30	12	15,5	0,8	35	14	18	2	2	314
22	23	35	14	18	1	40	16	20,5	2	2	415
25	26	40	16	20,5	1	45	18	23	2,5	2,5	531
28	29	45	18	23	1	50	20	25,5	3	3	661
31	32	50	20	25,5	1,5	55	22	28	3	3	804
34	35	55	22	28	1,5	60	24	30,5	3,5	3,5	962
37	38	60	24	30,5	1,5	67	26	34,5	4	4	1 134

Proračun zakovičnih spojeva

Zakovice računamo s obzirom na presjek A u zakovanom stanju, tj. prema promjeru rupe d_1, što je zakovica pri zakivanju gotovo sasvim ispuni.



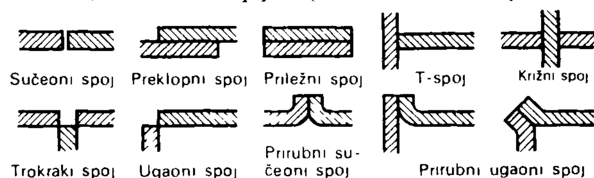
Sila F, koju može prenositi limena traka debljine s i širine, jednake razmaku t među zakovicama u redu, je

$$F = (t - d_1)s \quad \sigma_{dop} = A \quad \tau_{s\,dop} = d_1 s p_{dop}$$

gdje su: σ_{dop} – dopušteno vlačno naprezanje zakovice, $\tau_{s\,dop}$ – dopušteno smično naprezanje zakovice, p_{dop} – dopušteni bočni pritisak (između zakovice i lima).

Zavari

Oblici zavarenih spojeva (JUS C.T3.001 — 1971)



Vrste šavova i njihovi znakovi (JUS C.T3.011 — 1980)

Naziv šava	Presjek	Znak	Naziv šava	Presjek	Znak
I-šav		‖	Šav iz priruba		⅄
V-šav		V			
Polovični V-šav		V	Kutni šav		◺
Y-šav		Y			
Polovični Y-šav		Y	Kontasti šav		⊓
U-šav		Y			
Polovični U-šav		Y	Točkasti šav		○
X-šav		X			
Korijenski zavar		⌓	Kolutni šav		⊖

Dopunske oznake za oblik površine šava:
ravna: — ispupčena: ⌒ udubljena: ◡

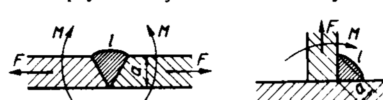
V-šav s ravnim tjemenom	V	X-šav s ispupčenim tjemenom	X
Kutni šav s udubljenim tjemenom	◺	U-šav s ravnim korijenskim zavarom	Y

Označivanje zavara na nacrtima — strelicom

Prikaz		Označivanje		
				nad crtom strelice, ako je tjeme zavara na strani strelice
				pod crtom strelice, ako je tjeme zavara na suprotnoj strani strelice
				kroz crtu strelice, ako je zavar na prekrivenim plohama spoja

Proračun zavarenih spojeva

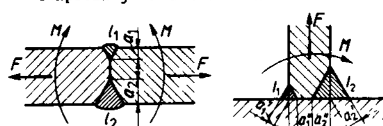
Naprezanja na vlak (tlak) σ zbog djelovanja sile F i naprezanje na savijanje σ_f zbog djelovanja momenta M iznose u osnovnim slučajevima zavarenih spojeva debljine zavara a i duljine l:



$$\sigma = \frac{F}{a\,l}$$

$$\sigma_f = \frac{6M}{a^2\,l}$$

Naprezanja u dvostranim zavarima:



$$\sigma = \frac{F}{a_1 l_1 + a_2 l_2}$$

$$a_1 = a_1' + a_1''$$

$$a_2 = a_2' + a_2''$$

$$\sigma_f = \frac{M}{W}$$

gdje je W — moment otpora zavara.

Dopuštena naprezanja u zavaru $\sigma_{dop\,zav}$ znatno su manja od normalnih dopuštenih naprezanja σ_{dop}: $\sigma_{dop\,zav} = \alpha\,\sigma_{dop}$.

Koeficijent zavarivanja α veoma ovisi o statičkom i dinamičkom opterećenju, vrsti zavarenog spoja i izvedbi zavara. Njegove su vrijednosti približno u slijedećim granicama:

		Vlak (tlak)	Savijanje	Smik
Statičko opterećenje:	sučeoni spoj	0,7...1,0	0,8...1,0	0,65
	T-spoj	0,6...0,7	0,6...0,7	0,65
Dinamičko opterećenje:	sučeoni spoj	0,5...0,9	0,6...0,9	0,6
	T-spoj — jednostrani	0,2...0,6	0,1...0,3	0,4
	— dvostrani	0,3...0,7	0,6...0,8	0,6

Pri običnoj izvedbi zavarenog spoja te se vrijednosti mogu smanjiti i do 50%.

Lemljeni spojevi

O lemovima v. str. 414 i 415.

Proračun lemljenih spojeva

Lemljene spojeve računamo uglavnom na smik, iznimno na vlak.

Sila F, koju prenosi lemljeni spoj opterećen na smik, iznosi

$$F = bl\tau_s$$

gdje su: b – širina spoja, l – duljina spoja.

Naprezanje τ_s u spoju, opterećenom na smik, ne smije biti veće od dopuštenog naprezanja $\tau_{s\,dop}$

$$\tau_s \leqq \tau_{s\,dop}$$

Čvrstoća na smik je najveća pri debljini lemnog sloja 0,05 . . . 0,2 mm.

Meki lemovi pri opterećenju puze; njihova čvrstoća s vremenom jako popušta (npr. meki lem S.Sn 40 ima kratkotrajnu čvrstoću na smik 35 N/mm^2, a nakon 10^5 h samo još 2 N/mm^2). Čvrstoća mekih lemova veoma ovisi i o temperaturi (pa npr. pri 150 °C može iznositi još samo 15% od vrijednosti pri 20 °C).

Čvrstoća lemljenih spojeva mnogo ovisi također o dinamičkom opterećenju (npr. srebrni lem pri 10^4 titraja ima čvrstoću 210 N/mm^2, a pri 10^7 titraja, samo još 170 N/mm^2.)

Lijepljeni spojevi

Lijepljeni se spojevi upotrebljavaju pri spajanju kovina i nekovina (drveta, umjetnih tvari, gume, stakla, porculana itd.). Za međusobno spajanje kovina dolazi u obzir lijepljenje naročito tamo gdje treba spriječiti gubitak svojstava, postignutih termičkom obradom (npr. kod termički obrađenog duraluminа) ili kod vrlo tankih dijelova.

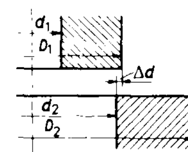
Kao ljepila se upotrebljavaju tvari na bazi umjetnih smola (trgovačka imena; araldit, reduks, bostik, metalon itd.). Pri njihovoj upotrebi treba se strogo pridržavati uputa proizvođača.

Čvrstoća lijepljenih spojeva posljedica je adhezije između ljepila i slijepljenog dijela (dok je značenje mehaničkog usidrenja mnogo manje). Deblji sloj ljepila ima manju čvrstoću (pri debljini 0,05 mm može iznosti npr. 38 N/mm^2, a pri debljini 1 mm još samo 15 N/mm^2).

Čvrstoća se lijepljenog spoja mnogo smanjuje pri višim temperaturama (ako npr. između −50 i +80 °C iznosi oko 25 N/mm^2, pri +150 °C može se smanjiti na samo 2 N/mm^2.)

Nadalje čvrstoća lijepljenog spoja mnogo ovisi o broju titraja (pa se može između 10^3 i 10^8 titraja smanjiti za 80%, a da pri 10^9 titraja još nije postignuta trajna dinamička čvrstoća).

Stezni spojevi



Stezne spojeve dobivamo navlačenjem obruča unutarnjeg promjera d_2 na rukavac većeg vanjskog promjera D_1, i to – obično – hlađenjem rukavca i zagrijavanjem obruča.

Relativna deformacija ε rukavca i obruča (s obzirom na prvobitni promjer rukavca) iznosi

$$\varepsilon = (D_1 - d_2)/D_1 = \Delta d/D_1$$

Pritisak p na plohi između rukavca i obruča u stegnutom stanju ovisi o dopuštenim naprezanjima u rukavcu $\sigma_{1\,dop}$ i obruču $\sigma_{2\,dop}$:

$$p \leqq \sigma_{1\,dop}[1 - (d_1/D_1)^2]/2 \qquad p \leqq \sigma_{2\,dop}[1 - (d_2/D_2)^2]/2$$

Po Hookeovu zakonu vrijedi za rukavac i obruč

$$\frac{\varepsilon}{p} = \frac{1}{E_1}\left[\frac{1 + (d_1/D_1)^2}{1 - (d_1/D_1)^2} - \frac{1}{m_1}\right] + \frac{1}{E_2}\left[\frac{1 + (d_2/D_2)^2}{1 - (d_2/D_2)^2} - \frac{1}{m_2}\right]$$

gdje su: E_1 i E_2 – moduli elastičnosti za rukavac i obruč, m_1 i m_2 – Poissonovi koeficijenti za rukavac i obruč.

Stezna deformacija

$$\Delta d = D_1 p(\varepsilon/p)$$

Temperaturne razlike, potrebne pri navlačenju:

Hlađenje rukavca za temperaturnu razliku $T_0 - T_1$ uzrokuje suženje rukavca za Δd_1, dok zagrijavanje obruča za temperaturnu razliku $T_2 - T_0$ uzrokuje proširenje obruča za Δd_2:

$$\Delta d_1 = \alpha_1 D_1(T_0 - T_1) \qquad \Delta d_2 = \alpha_2 d_2(T_2 - T_0)$$

gdje su: T_0 – temperatura okoline, T_1 – temperatura ohlađenog rukavca, T_2 – temperatura zagrijanog obruča, α_1 i α_2 – koeficijenti temperaturnog rastezanja rukavca i obruča (v. str. 157).

Ukupna promjena promjera treba da je veća od tražene stezne deformacije

$$\Delta d_1 + \Delta d_2 > \Delta d$$

Prijenosna sila F steznog spoja je

$$F = \mu D_1 \pi l p$$

gdje je l duljina korisne prijenosne površine rukavca.

Koeficijent trenja μ na plohi između rukavca i obruča u stegnutom stanju iznosi 0,05 . . . 0,19 (za srednje tvrdi čelik oko 0,16).

Prijenosni moment M_t steznog spoja je

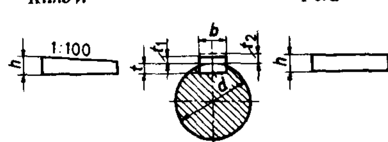
$$M_t = (d_2/2)F$$

RASTAVLJIVI SPOJEVI

Spojevi klinovima

Razlikujemo klinove (s nagibom 1 : 100) i pera.

Klinovi *Pera*



d — promjer osovine
b — širina } klina odn. pera
h — visina } klina odn. pera
dubina utora:
t — na osovini
t_1 — na glavini za klinove
t_2 — na glavini za pera

Osnovni standardizirani klinovi i pera prema JUS:

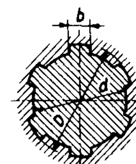
Klinovi (JUS M.C2.020 — 1957). — *Plosnati klinovi* (JUS M.C2.021 — 1957). — *Pera, visoka* (JUS M.C2.060 — 1957). — *Pera, niska* (JUS M.C2.061 — 1957).

d mm	*b* mm		JUS M.C2.020		JUS M.C2.060			JUS M.C2.021		JUS M.C2.061	
		h mm	*t* mm	t_1 mm	*t* mm	t_2 mm	*h* mm	*t* mm	t_1 mm	*t* mm	t_2 mm
6)...8	2	2	1,1	0,6	1,1	1,0	—	—	—	—	—
8)...10	3	3	1,7	1,0	1,7	1,4	—	—	—	—	—
10)...12	4	4	2,4	1,3	2,4	1,7	—	—	—	—	—
12)...17	5	5	2,9	1,8	2,9	2,2	3	—	—	1,9	1,2
17)...22	6	6	3,5	2,1	3,5	2,6	4	—	—	2,5	1,6
22)...30	8	7	4,1	2,4	4,1	3,0	5	1,3	3,2	3,1	2,0
30)...38	10	8	4,7	2,8	4,7	3,4	6	1,8	3,7	3,7	2,4
38)...44	12	8	4,9	2,6	4,9	3,2	6	1,8	3,7	3,9	2,2
44)...50	14	9	5,5	2,9	5,5	3,6	6	1,4	4,0	4,0	2,1
50)...58	16	10	6,2	3,2	6,2	3,9	7	1,9	4,5	4,7	2,4
58)...65	18	11	6,8	3,5	6,8	4,3	7	1,9	4,5	4,8	2,3
65)...75	20	12	7,4	3,9	7,4	4,7	8	1,9	5,5	5,4	2,7
75)...85	22	14	8,5	4,8	8,5	5,6	9	1,8	6,5	6,0	3,1
85)...95	25	14	8,7	4,6	8,7	5,4	9	1,9	6,4	6,2	2,9
95)...110	28	16	9,9	5,4	9,9	6,2	10	2,4	6,9	6,9	3,2
110)...130	32	18	11,1	6,1	11,1	7,1	11	2,3	7,9	7,6	3,5
130)...150	36	20	12,3	6,9	12,3	7,9	12	2,8	8,4	8,3	3,8
150)...170	40	22	13,5	7,7	13,5	8,7	14	4,0	9,1	—	—
170)...200	45	25	15,3	8,9	15,3	9,9	16	4,7	10,4	—	—
200)...230	50	28	17,0	10,1	17,0	11,2	18	5,2	11,7	—	—
230)...260	56	32	19,3	11,8	19,3	12,9	—	—	—	—	—
260)...290	63	32	19,6	11,5	19,6	12,6	—	—	—	—	—
290)...330	70	36	22,0	13,1	22,0	14,2	—	—	—	—	—
330)...380	80	40	24,6	14,5	24,6	15,6	—	—	—	—	—
380)...440	90	45	27,5	16,6	27,5	17,7	—	—	—	—	—
440)...500	100	50	30,4	18,7	30,4	19,8	—	—	—	—	—

Za klinove i pera upotrebljavamo čelik čvrstoće $R_m \geqq 600$ N/mm².

Utorni spojevi

Utorni spojevi s ravnim bokovima (JUS M.C1.410 — 1958)



Unutarnji promjer d
Vanjski promjer D
— za laku izvedbu D_1
— za srednju izvedbu D_2
Širina utora b
Broj utora n

d mm	D_1 mm	D_2 mm	*b* mm	*n*	*d* mm	D_1 mm	D_2 mm	*b* mm	*n*
11	—	14	3	6	42	46	48	8	8
13	—	16	3,5	6	46	50	54	9	8
16	—	20	4	6	52	58	60	10	8
18	—	22	5	6	56	62	65	10	8
21	—	25	5	6	62	68	72	12	8
23	26	28	6	6	72	78	82	12	10
26	30	32	6	6	82	88	92	12	10
28	32	34	7	6	92	98	102	14	10
32	36	38	6	8	102	108	112	16	10
36	40	42	7	8	112	120	125	18	10

Spojevi svornjacima i zaticima

Svornjaci

Standardizirani promjeri d

3 4 5 6 8 10 12 14 16 18 20 22 25 28 30
32 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

Obrađeni svornjaci { bez glave (JUS M.C3.040 — 1954) $d = 3 \ldots 100$ mm
Obrađeni svornjaci { s malom glavom (JUS M.C3.020 — 1954) $d = 3 \ldots 100$ mm
Poluobrađeni svornjaci { s velikom glavom (JUS M.C3.021 — 1954) $d = 6 \ldots 100$ mm
Poluobrađeni svornjaci { s malom glavom (JUS M.C3.022 — 1954) $d = 5 \ldots 100$ mm

Zatici

Standardizirani promjeri d

0,6 0,8 1 1,5 2 2,5 3 4 5 6 8 10 13 16 20 25 30 40 50

Cilindrični zatici

— u tolerancijskom polju h 8 (JUS M.C2.201 — 1952) $d = 0{,}8 \ldots 50$ mm
— u tolerancijskom polju h 11 (JUS M.C2.202 — 1952) $d = 0{,}8 \ldots 50$ mm
— u tolerancijskom polju m 6 (JUS M.C2.203 — 1952) $d = 1 \ldots 50$ mm

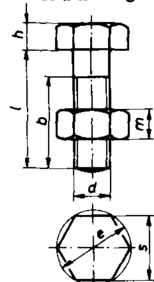
Zakaljeni cilindrični zatici (60 HRC)

— u tolerancijskom polju m 6 (JUS M.C2.204 — 1952) $d = 0{,}8 \ldots 20$ mm

Konični zatici (1 : 50), (promjer d mjeri se na užem kraju) (JUS M.C2.205 — 1952) $d = 0{,}6 \ldots 50$ mm

Vijčani spojevi

Standardiziranih vijaka i matica ima mnogo. Najobičniji su vijci sa šesterokutnom glavom i maticom (ISO).



Nazivne duljine tijela vijka i duljine navoja
(JUS M.B1.019 — 1972)

Duljine tijela l (mm):

2	(7)	14	(28)	45	75	(105)	140	200
2,5	8	16	30	50	80	110	150	220
3	(9)	(18)	(32)	55	85	(115)	160	240
4	10	20	35	60	90	120	170	260
5	(11)	(22)	(38)	65	(95)	(125)	180	280
6	12	25	40	70	100	130	190	300

Treba se kloniti duljina tijela u zagradama!

Duljine navoja b: za $l \leqq 125$ mm $b = 2d + 6$ mm
za $l = 125) \ldots 200$ mm $b = 2d + 12$ mm
za $l > 200$ mm $b = 2d + 25$ mm

Ako je $l \leqq b$, navoj se izvodi do glave vijka.

Vijci sa šesterokutnom glavom — izrade C i B (JUS M.B1.050/051 — 1976)
Šesterokutne matice za opće svrhe (JUS M.B1.600 — 1965)

Materijal: čelik ili mjed — bez propisanih mehaničkih svojstava. Mjere u mm

Nazivni promjer d	Normalne duljine tijela l	Duljina navoja vijka* b			Dimenzije glave vijka i matice			
		l_1	l_2	l_3	h	m	s	e
M 5	20... 50	16	—	—	3,5	4	8	8,63
M 6	25... 80	18	—	—	4	5	10	10,89
M 8	30...100	22	—	—	5,5	6,5	13	14,20
M 10	35...200	26	32	—	7	8	17	18,72
M 12	40...220	30	36	—	8	10	19	20,88
(M 14)	45...220	34	40	—	9	11	22	23,91
M 16	50...220	38	44	57	10	13	24	26,17
(M 18)	55...220	42	48	61	12	15	27	29,56
M 20	60...220	46	52	65	13	16	30	32,95
(M 22)	60...220	50	56	69	14	18	32	35,03
M 24	60...220	54	60	73	15	19	36	39,55
(M 27)	70...220	60	66	79	17	22	41	45,20
M 30	80...220	66	72	85	19	24	46	50,85
(M 33)	100...220	72	78	91	21	26	50	55,37
M 36	100...220	78	84	97	23	29	55	60,79
(M 39)	100...220	84	90	103	25	31	60	66,44
M 42	120...220	90	96	109	26	34	65	72,09
(M 45)	140...220	—	102	115	28	36	70	77,74
M 48	150...220	—	108	121	30	38	75	83,39
(M 52)	180...220	—	116	129	33	42	80	89,04

* Prema JUS M.B1.019 — 1972: $l_1 \leqq 125$ mm, $l_2 = 125) \ldots 200$ mm, $l_3 > 200$ mm.

Vijci sa šesterokutnom glavom izrade A: JUS M.B1.052 — 1976, *s navojem do glave*: JUS M.B1.053/055 — 1976, *s finim navojem*: JUS M.B1.057/060 — 1976.

Kvalitetni vijci i matice (JUS M.B1.023 – 1983 i 028 – 1975)

Vijci					Matice		
Razred čvrstoće	Naprez. tečenja R_e $R_{p0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Pos-tot. prod. A_5%	Tvrdoća	Razred čvrstoće	Čvrstoća N/mm²	Tvrdoća HV
4.6 [1]	240	400...550	25	110...170 HB	**4** [3]	400	302
4.8 [1]	320		14				
5.6 [1]	300	500...700	20	140. 215 HB	**5** [3]	500	302
5.8 [1]	400		10				
6.6 [1]	360	600...800	16	170...245 HB	**6** [3]	600	302
6.8 [1]	480		8				
6.9 [1]	540		12				
8.8 [2]	640	800...1000	12	225.. 300 HV	**8**	800	302
10.9 [2]	900	1000...1200	9	280.. 370 HV	**10** [4]	1000	353
12.9 [2]	1 080	1200...1400	8	330...440 HV	**12** [4]	1200	353
14.9 [2]	1 260	1400...1600	7	400.. 510 HV	**14** [4]	1400	380

[1] Nelegirani čelici (P ≦ 0,06%, S ≦ 0,07%) i čelici za automate (P ≦ 0,12%, S ≦ 0,34%, Pb ≦ 0,35%).

[2] Poboljšani čelici, nelegirani (C = 0,32...0,5%) i legirani (C = 0,19... ...0,52%):

Razred čvrstoće:	8.8	10.9	12.9	14.9
Cr + Mo + Ni + V ≧	0...0,5	0...0,9	0,9...1,5	1,5...2,5

[3] Nelegirani čelici (C ≦ 0,5%, P ≦ 0,110%, S ≦ 0,150%).

[4] Mn – čelici (C ≦ 0,58%, Mn ≧ 0,30...0,45%).

Preporučeni promjeri svrdla za rupe pred narezivanjem navoja
(JUS M.B1.003 – 1972)

Oznaka navoja	Promjer svrdla mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla mm
M 1	0,75	M 3,5	2,9	M 12	10,2	M 36	32
M 1,1	0,85	M 4	3,3	M 14	12	M 39	35
M 1,2	0,95	M 4,5	3,7	M 16	14	M 42	37,5
M 1,4	1,1	M 5	4,2	M 18	15,5	M 45	40,5
M 1,6	1,25	M 6	5	M 20	17,5	M 48	43
M 1,8	1,45	M 7	6	M 22	19,5	M 52	47
M 2	1,6	M 8	6,8	M 24	21	M 56	50,5
M 2,2	1,75	M 9	7,8	M 27	24		
M 2,5	2,05	M 10	8,5	M 30	26,5		
M 3	2,5	M 11	9,5	M 33	29,5		

Promjeri provrta za vijke s metarskim navojem
(JUS M.B1.004 – 1986)

Oznaka navoja	Promjer provrta* f	s	g	Oznaka navoja	Promjer provrta* f	s	g	Oznaka navoja	Promjer provrta* f	s	g
M 1	1.1	1.2	1.3	M 14	15	15.5	16.5	M 64	66	70	74
M 1.2	1.3	1.4	1.5	M 16	17	17.5	18.5	M 68	70	74	78
M 1.4	1.5	1.6	1.8	M 18	19	20	21	M 72	74	78	82
M 1.6	1.7	1.8	2	M 20	21	22	24	M 76	78	82	86
M 1.8	2.0	2.1	2.2	M 22	23	24	26	M 80	82	86	91
M 2	2.2	2.4	2.6	M 24	25	26	28	M 85	87	91	96
M 2.5	2.7	2.9	3.1	M 27	28	30	32	M 90	93	96	101
M 3	3.2	3.4	3.6	M 30	31	33	35	M 95	98	101	107
M 3.5	3.7	3.9	4.2	M 33	34	36	38	M 100	104	107	112
M 4	4.3	4.5	4.8	M 36	37	39	42	M 105	109	112	117
M 4.5	4.8	5	5.3	M 39	40	42	45	M 110	114	117	122
M 5	5.3	5.5	5.8	M 42	43	45	48	M 115	119	122	127
M 6	6.4	6.6	7	M 45	46	48	52	M 120	124	127	132
M 7	7.4	7.6	8	M 48	50	52	56	M 125	129	132	137
M 8	8.4	9	10	M 52	54	56	62	M 130	134	137	144
M 10	10.5	11	12	M 56	58	62	66	M 140	144	147	155
M 12	13	13.5	14.5	M 60	62	66	70	M 150	155	158	165

* f – fina izrada (za finu mehaniku, precizne strojeve i alat); s – osrednja izrada (za opće strojarstvo); g – gruba izrada (za grube dijelove, lijevane rupe).

P r o r a č u n v i j a k a

a) *Vijci za pričvršćivanje*

Maksimalna sila F_{max}, koje može prenositi vijak presjeka A (s promjerom jezgre navoja d_1), iznosi

$$F_{maks} \leqq A\,\sigma_{dop} \qquad A = d_1^2\pi/4$$

Dopušteno naprezanje σ_{dop} za vijke određujemo obično ovisno o naprezanju tečenja R_e ($R_{p\,0,2}$)

$$\sigma_{dop} \approx 0{,}3\,R_e$$

Za prednapregnute vijke uzimamo $F_{max} = (1{,}3 \ldots 1{,}6)\,F$, gdje je F vanjska sila, kojom opterećujemo vijak na vlak.

b) *Vijci za prijenos gibanja* (obično s trapeznim ili pilastim navojem)

Nosiva sila F određuje se – osim proračunom čvrstoće (kao pod a) – još i s obzirom na bočni pritisak p dodirnih ploha u navoju

$$F_{maks} \leqq \frac{(d^2 - d_1^2)\pi}{4}\,p\,n$$

gdje su: d – vanjski promjer vijka; n – broj nosivih navoja.

Bočni pritisak p kod brončanih matica iznosi:

za vijke od mekog čelika $p \leqq 7{,}5$ N/mm^2

za vijke od tvrdog čelika $p \leqq 16$ N/mm^2

Osovine

Okrugle osovine promjera d mogu prenositi moment vrtnje T

$$T = W_p\,\tau_{t\,dop}$$

gdje je W_p – polarni moment otpora okrugle osovine

$$W_p = (\pi/16)d^3 \approx 0{,}2\,d^3$$

a $\tau_{t\,dop}$ je dopušteno naprezanje na torziju.

Za osovine uzimamo čelik čvrstoće $R_m = 420 \ldots 700$ N/mm^2. Ako dodatni momenti savijanja nisu poznati, računamo s dopuštenim naprezanjem na torziju $\tau_{t\,dop}$ ovisno o promjeru osovine d

d (mm)	...25	25...50	50...80	80...
$\tau_{t\,dop}$ (N/mm^2)	10	20	30	40

Ako su, međutim, momenti savijanja poznati, treba osovinu računati pomoću sastavljenih opterećenja (v. str. 122).

Za prijenos momenta vrtnje T treba promjer osovine d biti

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi}\cdot\frac{T}{\tau_{t\,dop}}} \approx \sqrt[3]{\frac{5\,T}{\tau_{t\,dop}}}$$

Moment vrtnje možemo izraziti snagom P, koju osovina prenosi, i brzinom vrtnje osovine n

$$T = \frac{P}{2\pi n}$$

Remenski prijenos

Zbog trenja između remena i remenice sila F_1 u vučnoj strani remena veća je od sile F_2 u povratnoj strani

$$F_1 > F_2 \qquad \frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} = e^{\mu\hat{\alpha}} \qquad F_c = m_l v^2 = \varrho A v^2$$

gdje su: e – baza prirodnih logaritama, μ – koeficijent trenja, $\hat{\alpha}$ obuhvatni kut (rad) remena na remenici, F_c – sila u remenu zbog centrifugalne sile, m_l – duljinska masa remena (kg/m), ϱ – gustoća remena, A – presjek remena, v – brzina remena.

Vrijednosti izraza $e^{\mu\hat{\alpha}}$

μ	α 120°	140°	160°	180°	200°	220°
0,2	1,52	1,63	1,75	1,88	2,01	2,16
0,4	2,31	2,66	3,06	3,51	4,04	4,65
0,6	3,51	4,33	5,34	6,59	8,12	10,0
0,8	5,34	7,06	9,34	12,4	16,3	21,6

Obodna sila F

$$F = F_1 - F_2 = (F_1 - F_c)(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)/e^{\mu\hat{\alpha}} = (F_2 - F_c)(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$$

Snaga P, koju remen prenosi pri obodnoj brzini $v = d\pi n$

$$P = Fv = (F_1 - F_2)d\pi n$$

Sila F_1, kojom je remen napregnut (u vučnom dijelu):

$$F_1 = (F_1 - F_2)e^{\mu\hat{\alpha}}/(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1) + F_c = A\sigma_{dop}$$

gdje su: A – presjek remena, σ_{dop} – dopušteno naprezanje remena.

Prijenosni omjer i je omjer brzine vrtnje n_1 pogonske remenice i brzine vrtnje n_2 gonjene remenice: $i = n_1/n_2$.

a) Plosnati remeni

izrađuju se od kože, gume, tekstila, umjetnih masa itd.

Širine remena i remenica (JUS M.C1.231 – 1965)

Mjere u mm

b	b'	b	b'	b	b'	b	b'	b	b'
16	20	50	63	100	112	180	200	315	355
20	25	63	71	112	125	200	224	355	400
25	32	71	80	125	140	224	250	400	450
32	40	80	90	140	160	250	280	450	500
40	50	90	100	160	180	280	315	500	560, 630

Promjeri remenica d (mm) (JUS M.C1.241 – 1965)

40	56	80	112	160	224	315	450	630	900	1250	1800
45	63	90	125	180	250	355	500	710	1000	1400	2000
50	71	100	140	200	280	400	560	800	1120	1600	

Izbočenost vijenca remenice h (JUS M.C1.242 – 1965). Mjere u mm

d	h	d	h	d	h
40...112	0,3	160, 180	0,5	250, 280	0,8
125, 140	0,4	200, 224	0,6	315, 355	1,0

Izbočenost za $d = 400 \dots 2000$ mm iznosi između 1 i 6 mm (ovisi i o širini remenice b').

Specifična snaga P/A, tj. prijenosna snaga remena P po jedinici presjeka A, ovisi o materijalu remena, obuhvatnom kutu α, relativnoj debljini s/d (s = debljina remena, d = promjer remenice) i o obodnoj brzini v.

Specifična snaga P/A za plosnati kožni remen pri obuhvatnom kutu $\alpha = 180°$

s/d	P/A (kW/mm²), v (m/s): 5	10	15	20	25	30	35	40
1 : 400	0,013	0,025	0,036	0,047	0,056	0,063	0,065	0,063
1 : 200	0,012	0,023	0,034	0,045	0,053	0,060	0,062	0,059
1 : 100	0,011	0,021	0,032	0,042	0,049	0,055	0,057	0,053
1 : 50	0,010	0,019	0,029	0,037	0,043	0,047	0,048	0,042

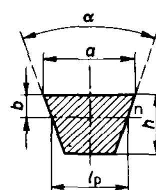
Prijenosni je omjer kod plosnatih remena: $i \leqq 5$.

b) Beskonačni klinasti remeni

Profil klinastih remena je trapez širine (dulje) osnovice a i visine h, bočne stranice zatvaraju kut od 40°.

Normalni klinasti remeni (JUS G.E2.053 — 1964)

Oznaka profila	Dimenzije (mm): a	h	b	l_p	L_p
Y	6	4	1,6	5,3	200... 1250
Z	10	6	2,4	8,5	400... 2800
A	13	8	3,1	11	560... 4000
B	17	11	4,1	14	800... 6300
C	22	14	5,6	19	1400... 9000
D	32	19	8,2	27	2240...18000
E	38	25	9,7	32	3150...18000



n — neutralna os
$\alpha = 40 \pm 1°$

Uski klinasti remeni

Oznaka profila	Dimenzije (mm): a	h	b	l_p	L_p
SPZ	9,7	8	2	8,5	630... 3550
SPA	12,7	10	2,75	11	800... 4500
SPB	16,3	13	3,5	14	1250... 8000
SPC	22	18	4,8	19	2000...12500

Računske duljine L_p (mm) (JUS G.E2.053 — 1964)

200	355	630	1120	2000	3550	6300	11200
224	400	710	1250	2240	4000	7100	12500
250	450	800	1400	2500	4500	8000	14000
280	500	900	1600	2800	5000	9000	16000
315	560	1000	1800	3150	5600	10000	18000

Snaga P, što je prenosi klinasti remen, ovisi o obuhvatnom kutu α, o najmanjem promjeru remenice d_{min} i o obodnoj brzini v.

Snaga P klinastog remena pri obuhvatnom kutu $\alpha = 180°$

Oznaka profila	d_{min} mm	P(kW), v (m/s): 2	4	6	10	14	18	22	26
Y	32	0,037	0,074	0,11	0,16	0,19	0,19	0,15	0,058
Z	63	0,14	0,27	0,41	0,64	0,81	0,88	0,88	0,74
A	90	0,27	0,55	0,81	1,25	1,6	1,9	2,0	1,9
B	125	0,51	0,96	1,4	2,3	2,9	3,4	3,5	3,3
C	210	0,89	1,75	2,6	4,1	5,3	6,1	6,4	5,9
D	345	1,7	3,3	4,8	7,7	10,0	11,5	12.1	11,2
E	490	2,6	5,2	7,7	11,9	15,4	18,1	18,9	17,5

Pri manjem obuhvatnom kutu α valja vrijednosti za snagu P množiti s faktorom k

$\alpha°$	170	160	150	140	130	120	110	100	90
k	0,98	0,95	0,92	0,89	0,86	0,82	0,78	0,73	0,68

Prijenosni je omjer kod klinastih remena $i \leqq 10 (\dots 15)$.

Lančani prijenos

Obodna sila F_0 proizlazi iz snage što je prenosi lanac pri brzini v, odnosno iz momenta vrtnje T lančanika (lančanog zupčanika) i promjera njegove diobene kružnice d_0

$$F_0 = \frac{P}{v} = \frac{2T}{d_0}$$

pri čemu brzina lanca, koja je jednaka obodnoj brzini na diobenom valjku, ovisi o brzini vrtnje n

$$v = d_0 \pi n$$

U lancu djeluje još i komponenta centrifugalne sile

$$F_c = m_l v^2$$

gdje je m_l – duljinska masa lanca (kg/m).

Ukupna sila, kojom je opterećen lanac, iznosi

$$F = F_0 + F_c$$

Bočni pritisak p na dodirne plohe članaka A

$$p = \frac{F}{A} < p_{dop}$$

Dopušteni bočni pritisak p_{dop} ovisi o brzini lanca v, a iznosi pri uobičajenim pogonskim prilikama:

v (m/s)	0,1	0,5	1,0	1,5	2	3	4	5,5	7	9	12
p (N/mm^2)	3100	2800	2600	2400	2250	2050	1850	1600	1400	1250	1000

Lančanici

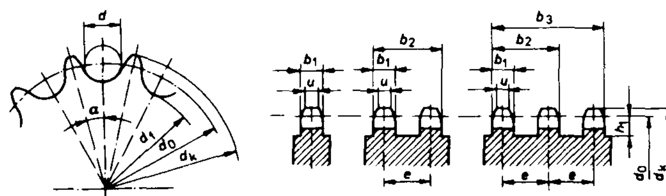
Promjer diobenog valjka d_0

$$d_0 = \frac{h}{\sin \alpha} = hN \qquad \alpha = \frac{180°}{z}$$

gdje su: h – korak lanca; α (°) – polovični kut među susjednim zupcima; z – broj zubaca lančanika.

Vrijednosti N

z	N	z	N	z	N	z	N	z	N
6	2,0000	16	5,1258	26	8,2962	36	11,4737	46	14,6537
7	2,3048	17	5,4422	27	8,6138	37	11,7916	47	14,9717
8	2,6131	18	5,7588	28	8,9314	38	12,1096	48	15,2898
9	2,9238	19	6,0755	29	9,2491	39	12,4275	49	15,6079
10	3,2361	20	6,3925	30	9,5668	40	12,7455	50	15,9260
11	3,5495	21	6,7095	31	9,8845	41	13,0635	51	16,2441
12	3,8637	22	7,0267	32	10,2023	42	13,3815	52	16,5622
13	4,1786	23	7,3439	33	10,5201	43	13,6995	53	16,8803
14	4,4940	24	7,6613	34	10,8380	44	14,0176	54	17,1984
15	4,8097	25	7,9787	35	11,1558	45	14,3356	55	17,5166

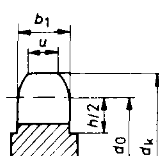


Tjemeni valjak
- za $z = 7 \ldots 12$ $\quad d_k = d_o + (0{,}5 \ldots 0{,}6)d$
- za $z = 13 \ldots 25$ $\quad d_k = d_o + (0{,}6 \ldots 0{,}7)d$
- za $z \geqq 26$ $\quad d_k = d_o + (0{,}7 \ldots 0{,}8)d$

Lančanici za člankaste lance s valjcima

Lanac (mm)		Dimenzije lančanika (mm)				
h	e	b_1	b_2	b_3	u	h_1 min
6	5,5	2,5	8	–	1,3	3,5
8	5,64	2,7	8,3	–	1,5	5
12,7	–	3	–	–	2	8
12,7	–	4,4	–	–	3	8
25,4	31,88	15,4	47	79	11	17
25,4	31,4	15,4	53	90,2	11	17
31,75	36,45	18	54,5	91	13	19
38,1	48,36	23	71,4	120	16	25
44,45	59,56	28	87,6	147	20	28
50,8	58,55	28	86,6	145	20	31
63,5	72,29	34	106	178	24	41
76,2	91,21	41	132	233	29	48

Lančanici za člankaste lance s tuljcima i svornjacima



Tjemeni valjak lančanika:
- za lance s tuljcima

$$d_k = d_o + (0{,}8 \ldots 1)d$$

- za lance sa svornjacima

$$d_k = d_o + (3 \ldots 4 \text{ mm})$$

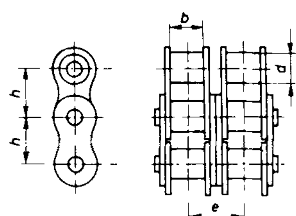
*

$$b_1 \approx 0{,}9\ b \qquad u \approx 0{,}6\ b$$

b je nosiva širina lanca (vidi str. 558 i 559).

Članakasti lanci

su lanci s valjcima, tuljcima i svornjacima.



h – korak
b – nosiva širina članka
d – nosivi promjer članka
e – razmak među člancima

Članakasti lanci s valjcima (JUS M.C1.820 – 1960), jedno-, dvo- in troredni

Dimenzije (mm)				Prekidna sila (kN)			Duljin. masa (kg/m)		
h	b min	d	e	jedno-redni	dvo-redni	tro-redni	jedno-redni	dvo-redni	tro-redni
6	2,8	4	—	3	—	—	0,12	—	—
8	3	5	5,64	5	9	—	0,18	0,36	—
12,7	3,3	7,75	—	8	—	—	0,40	—	—
12,7	4,88	7,75	—	8	—	—	0,44	—	—
25,4	17,02	15,88	31,88	45	80	115	2,7	5,4	8
(30)	17,02	15,88	—	45	—	—	2,5	—	—
31,75	19,56	19,05	36,45	55	100	140	3,6	7,2	11
38,1	25,4	25,4	48,36	120	215	300	6,7	13,5	21
44,45	30,99	27,94	59,56	140	250	360	8,3	16,6	25
50,8	30,99	29,21	58,55	180	320	450	10,5	21	32
63,5	38,1	39,37	72,29	270	480	680	16	32	48
76,2	45,75	48,26	91,21	400	700	1000	25	50	75

Članakasti lanci s valjcima:

- za povećano opterećenje (JUS M.C1.821 – 1960)
- s dugim člancima (JUS M.C1.822 – 1960)
- za poljoprivredne strojeve (JUS M.C1.827 – 1967)

Članakasti lanci s tuljcima (JUS M.C1.830 — 1960) — jednoredni

Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)	Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)
h	b	d			h	b	d		
15	14	9	12,5	1,20	55	45	30	125	13,6
20	16	12	25	2,15	60	50	32	160	14,9
25	18	15	31,5	2,55	65	55	36	200	18,9
30	20	17	40	4,00	70	65	42	250	24,7
35	22	18	50	4,30	80	70	44	315	31,0
40	25	20	63	5,50	90	80	50	400	41,8
45	30	22	80	7,55	100	90	56	500	48,4
50	35	26	100	9,04					

Članakasti (Gallovi) lanci sa svornjacima (JUS M.C1.840/841-1960) — jednoredni

Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)	Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)
h	b	d			h	b	d		
Laki lanci									
20	8	7	2,5	0,26	50	20	11	40	2,76
25	12	5	5	0,35	60	22	12	60	3,14
35	15	8	12,5	0,69	70	25	14	80	3,31
40	18	10	25	1,25	80	30	17	100	4,50
Teški lanci									
3,5	2	2	0,75	0,07	45	30	17	100	6,4
6	4	3	1,25	0,16	50	35	22	150	10,6
8	6	3,5	1,5	0,25	55	40	24	200	15,5
10	8	4	2,5	0,40	60	45	26	250	18,0
15	12	5	5	0,70	70	50	32	375	33,5
20	15	8	12,5	1,10	80	60	36	500	38,2
25	18	10	25	1,75	90	70	40	750	53,0
30	20	11	40	3,4	100	80	45	1000	76,6
35	22	12	60	4,5	110	90	50	1250	90,0
40	25	14	80	4,7	120	100	55	1500	112

Broj članaka lanca x

$$x = 2\frac{a}{h} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \frac{h}{a}\left(\frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2$$

pri čemu znače: a — razmak osi; h — korak lanca; z_1 — broj zubaca malog lančanika; z_2 — broj zubaca velikog lančanika.

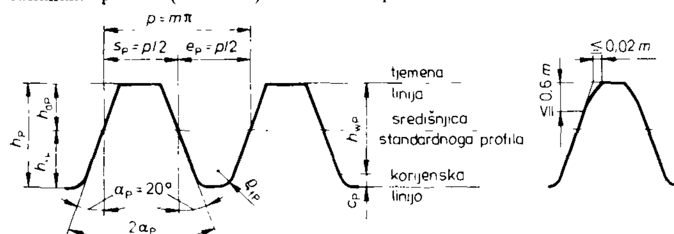
Zupčani prijenos

Prijenosni omjer i je omjer brzine vrtnje pogonskog zupčanika n_1 i gonjenog zupčanika n_2, odnosno broja zubaca gonjenog zupčanika z_2 i malog pogonskog z_1

$$i = n_1/n_2 = z_2/z_1$$

$i > 1$ – prijenos na manju brzinu; $i < 1$ – prijenos na veću brzinu

Standardni profil evolventnih zupčanika (JUS M.C1.016 – 1958) – s novijim oznakama po ISO (DIN 876) osim oznaka po JUS:



Standardni profil koji treba upotrebljavati pri projektiranju i izradbi evolventnih čelnika (cilindričnih zupčanika)

Korekcija profila koju, u slučaju potrebe, treba izvesti samo na glavi zupca

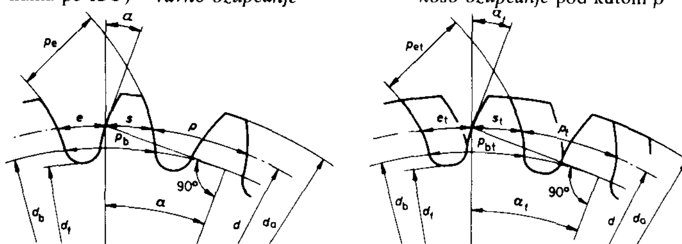
Veličina	Oznaka	
	ISO	JUS
standardni modul	$m = d/z$	m_n
korak	$p = m\pi$	t_n
visina zubnog vrha	$h_{aP} = m$	h_k
visina zubnog korijena	$h_{fP} = m + c$	h_f
visina ravnoga dijela	$h_{wP} = 2\,m$	h_n
visina zaokruženja	$c_P = 0{,}17\,m;\ 0{,}25\,m;\ 0{,}3\,m$	$c_n\ m_n$
polumjer zaokruženja	$\varrho_{fP} = 0{,}25\,m;\ 0{,}38\,m;\ 0{,}45\,m$	ϱ_n
visina zuba	$h_P = 2\,m + c$	h
kut nagiba	$\alpha_P = 20°$	α_n
bočni kut	$2\,\alpha_P$	–

Standardni moduli m (mm) po ISO (JUS M.C1.015 – 1965):

1	1,375	**2**	2,75	3,5	4,5	**6**	**8**	11	**16**	22	**32**	45
1,125	**1,5**	2,25	**3**	(3,75)	**5**	(6,5)	9	**12**	18	**25**	36	**50**
1,25	1,75	**2,5**	(3,25)	**4**	5,5	7	**10**	14	**20**	28	**40**	

Upotrebljavati valja u prvom redu debelo tiskane vrijednosti modula (1. prednost), tanko tiskane u slučaju opravdanih razloga (2. prednost), a vrijednosti u zagradama samo iznimno (3. prednost).

Parovi čelnika (cilindričnih zupčanika) (JUS M.C1.012 – 1958) (s oznakama po ISO) *ravno ozupčanje* *koso ozupčanje* pod kutom β



Veličine parova čelnika	ravno ozubljenje	koso ozubljenje
Modul	$m = m_n$*	$m_t = m_n/\cos\beta$
Zahvatni kut	$\alpha = (\alpha_P = 20°)$	$\alpha_t = \text{arc tan}\,(\tan\alpha_P/\cos\beta)$
Diobeni cilindar		
– promjer	$d = mz$	$d = m_t z = m_n z/\cos\beta$
– korak	$p = m\pi$	$p_t = m_t\pi = m_n\pi/\cos\beta$
– osnovni korak	$p_b = p\cos\alpha$	$p_{bt} = p_t\cos\alpha_t$
– korak među evolventnim bokovima	$p_e = p\cos\alpha = p_b$	$p_{et} = p_t\cos\alpha_t = p_{bt}$
Debljina zupca		
– pri vanjskom ozupčanju	$s = p/2 + 2xm\tan\alpha$	$s_t = p_t/2 + 2xm_t\tan\alpha_t$
– pri unutar. ozupčanju	$s = p/2 - 2xm\tan\alpha$	$s_t = p_t/2 - 2xm_t\tan\alpha_t$
Širina međuzublja	$e = p - s$	$e_t = p_t - s_t$
Promjeri korijenskih cilindara		
– pri vanjskom ozupčanju		
za pogonski zupčanik	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_1 m)$	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_1 m_t)$
za gonjeni zupčanik	$d_{f2} = d_2 - 2(h_{fP} - x_2 m)$	$d_{f2} = d_2 - 2(h_{fP} - x_2 m_t)$
– pri unut. ozupčanju		
za pogonski zupčanik	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_1 m)$	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_1 m_t)$
za gonjeni zupčanik	$d_{f2} = d_2 + 2(h_{fP} + x_2 m)$	$d_{f2} = d_2 + 2(h_{fP} + x_2 m_t)$
Promjeri osnovnih cilindara	$d_b = d\cos\alpha$	$d_b = d\cos\alpha_t$
Promjeri tjemenskih cilindara		
– pri vanjskom ozupčanju		
za pogonski zupčanik	$d_{a1} = 2(a - 0{,}5\,d_{f2} - c_2)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{a2} = 2(a - 0{,}5\,d_{f1} - c_1)$	
– pri unut. ozupčanju		
za pogonski zupčanik	$d_{a1} = d_{f2} - 2(a + c_2)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{a2} = d_{f1} + 2(a + c_1)$	
Promjeri kinematičkih cilindara		a = razmak osi
– pri vanjskom ozupčanju		
za pogonski zupčanik	$d_{w1} = 2a/(i + 1)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{w2} = 2ai/(i + 1) = id_{w1}$	
– pri unutar. ozupčanju		
za pogonski zupčanik	$d_{w1} = 2a/(i - 1)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{w2} = 2ai/(i - 1) = id_{w1}$	

* m_n – normalni modul (modul u normalnoj ravnini presjeka).

Pomak profila osnovne ozubnice izražava se umnoškom koeficijenta pomaka profila osnovne ozubnice x (koji je ovisan od broja zubaca i upadnog kuta α) i modula:

pri ravnom ozupčanju: xm $\quad (x_{\min} = 1 - 0{,}5\, z \sin^2 \alpha)$
pri kosom ozupčanju: xm_t $\quad (x_{\min} = 1 - 0{,}5\, z \sin^2 \alpha_t)$

Pomakom profila osnovne ozubnice povećava se nosivost, sprečava podrezivanje pri malom broju zubaca ($z < 17$), a smanjuje relativna brzina klizanja.

Razmak osi

pri ravnom ozupčanju — pri kosom ozupčanju

– pri vanjskom ozupčanju:

$a = 0{,}5\, m(z_1 + z_2) \cos \alpha / \cos \alpha_w$ $\qquad$ $a = 0{,}5\, m_t(z_1 + z_2) \cos \alpha_t / \cos \alpha_{wt}$

– pri unutarnjem ozupčanju:

$a = 0{,}5\, m(z_2 - z_1) \cos \alpha / \cos \alpha_w$ $\qquad$ $a = 0{,}5\, m_t(z_2 - z_1) \cos \alpha_t / \cos \alpha_{wt}$

dok za pogonski zahvatni kut α_w odn. α_{wt} vrijedi:

– pri vanjskom ozupčanju:

$\text{inv}\, \alpha_w = 2(x_1 + x_2)/(z_1 + z_2) \cdot \tan \alpha + \text{inv}\, \alpha$ $\qquad$ $\text{inv}\, \alpha_{wt} = 2(x_1 + x_2)/(z_1 + z_2) \cdot \tan \alpha_t + \text{inv}\, \alpha_t$

– pri unutarnjem ozupčanju:

$\text{inv}\, \alpha_w = 2(x_2 - x_1)/(z_2 - z_1) \cdot \tan \alpha + \text{inv}\, \alpha$ $\qquad$ $\text{inv}\, \alpha_{wt} = 2(x_2 - x_1)/(z_2 - z_1) \cdot \tan \alpha_t + \text{inv}\, \alpha_t$

Vrijednost evolventne funkcije inv α ($= \tan \alpha - \hat{\alpha}$) – vidi str. 33!

Mjerni broj zubaca

$$k = \frac{z}{\pi} (\tan \alpha_x - \text{inv}\, \alpha) - \frac{2x \tan \alpha}{\pi} + 0{,}5 \qquad k = \frac{z}{\pi} \left(\frac{\tan \alpha_{xt}}{\cos^2 \beta_b} - \text{inv}\, \alpha_t \right) - \frac{2x \tan \alpha_t}{\pi} + 0{,}5$$

pri čemu je

$$\tan \alpha_x = \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{4(x/z)(1 + x/z)}{\cos^2 \alpha}} \qquad \tan \alpha_{xt} = \sqrt{\tan^2 \alpha_t + \frac{4(x/z)(1 + x/z)}{\cos^2 \alpha_t}}$$

$\sin \beta_b = \sin \beta \cos \alpha_n$
pri čemu je $\alpha_n = \alpha_P$

Mjerni broj zubaca k zaokružujemo na najbliži cijeli broj.

Ako je $x = 0$, dobivamo:

$k = z\hat{\alpha}/\pi + 0{,}5$ $\qquad$ $k = z(\hat{\alpha}_t + \tan \alpha_t \cdot \tan^2 \beta_b)/\pi + 0{,}5$

Mjera pomoću zubaca:

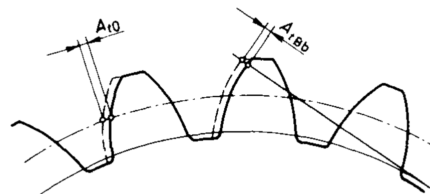
$W = m \cos \alpha\, [\pi(k - 0{,}5) + z\, \text{inv}\, \alpha + 2\, x \tan \alpha]$ $\qquad$ $W = m \cos \alpha_t\, [\pi\, (k - 0{,}5) + z\, \text{inv}\, \alpha_t + 2\, x \tan \alpha_t] \cdot \cos \beta_b$

Tolerancije parova evolventnih čelnika (ISO)
(JUS M.C1.031 – 1966)

Za sve tolerancije parova čelnika s evolventnim zupcima predviđeno je 12 kvaliteta – osim za tolerancije razmaka osi, za koje je predviđeno 6 kvaliteta. Kvaliteta izražava stupanj točnosti, tj. odgovarajuću veličinu tolerancije.

Granična odstupanja koraka zubnog profila A_{to} i dopušteni zbroj odstupanja koraka zubnog profila TT_{to}

Kvaliteta	A_{to} gornje $A_{to,g}$ (μm)	A_{to} donje $A_{to,g}$ (μm)	TT_{to} (μm)
1	$0{,}66\,\varphi_p + 0{,}80$		$0{,}25\,\sqrt{N} + 0{,}60$
2	$0{,}10\,\varphi_p + 1{,}25$		$0{,}40\,\sqrt{N} + 1{,}00$
3	$0{,}16\,\varphi_p + 2{,}00$		$0{,}63\,\sqrt{N} + 1{,}60$
4	$0{,}25\,\varphi_p + 3{,}20$		$1{,}00\,\sqrt{N} + 2{,}50$
5	$0{,}40\,\varphi_p + 5{,}00$		$1{,}60\,\sqrt{N} + 4{,}00$
6	$0{,}63\,\varphi_p + 8{,}00$		$2{,}50\,\sqrt{N} + 6{,}00$
7	$0{,}90\,\varphi_p + 11{,}00$	$A_{to,d} =$	$3{,}55\,\sqrt{N} + 8{,}00$
8	$1{,}25\,\varphi_p + 16{,}00$	$= - A_{to,g}$	$5{,}00\,\sqrt{N} + 12{,}00$
9	$1{,}80\,\varphi_p + 22{,}00$		$7{,}10\,\sqrt{N} + 17{,}00$
10	$2{,}50\,\varphi_p + 32{,}00$		$10{,}00\,\sqrt{N} + 25{,}00$
11	$3{,}55\,\varphi_p + 45{,}00$		$14{,}00\,\sqrt{N} + 33{,}00$
12	$5{,}00\,\varphi_p + 63{,}00$		$20{,}00\,\sqrt{N} + 50{,}00$
	$\varphi_p = m_n + 0{,}25\sqrt{d}$ m_n (mm), d (mm)		$N = 0{,}5\, z\, m\, \pi$ m (mm)



Granična odstupanja pri osnovnom koraku bokova zubaca

– za zupčanike s ravnim zupcima

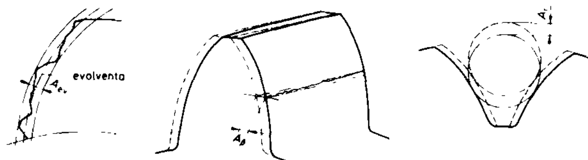
$A_{tBb,g} = A_{to,g}$ $\qquad$ $A_{tBb,d} = A_{to,d}$

– za zupčanike s kosim zupcima

$A_{tBb,g} = A_{to,g} \cdot \cos \beta_0$ $\qquad$ $A_{tBb,d} = A_{to,d} \cdot \cos \beta_0$

Tolerancije profila T_{ev} i bočne linije zupca T_β

Kvalitetni razred	T_{ev} (µm)	T_β (µm)
1	$0{,}06\,\varphi_p + 2{,}00$	$0{,}315\,\sqrt{b} + 1{,}60$
2	$0{,}10\,\varphi_p + 2{,}50$	$0{,}40\,\sqrt{b} + 2{,}00$
3	$0{,}16\,\varphi_p + 3{,}00$	$0{,}50\,\sqrt{b} + 2{,}50$
4	$0{,}25\,\varphi_p + 4{,}00$	$0{,}63\,\sqrt{b} + 3{,}00$
5	$0{,}40\,\varphi_p + 5{,}00$	$0{,}80\,\sqrt{b} + 4{,}00$
6	$0{,}63\,\varphi_p + 6{,}30$	$1{,}00\,\sqrt{b} + 5{,}00$
7	$1{,}00\,\varphi_p + 8{,}00$	$1{,}25\,\sqrt{b} + 6{,}00$
8	$1{,}60\,\varphi_p + 10{,}00$	$2{,}00\,\sqrt{b} + 10{,}00$
9	$2{,}50\,\varphi_p + 16{,}00$	$3{,}15\,\sqrt{b} + 16{,}00$
10	$4{,}00\,\varphi_p + 25{,}00$	$5{,}00\,\sqrt{b} + 25{,}00$
11	$6{,}30\,\varphi_p + 40{,}00$	$8{,}00\,\sqrt{b} + 40{,}00$
12	$10{,}00\,\varphi_p + 63{,}00$	$12{,}50\,\sqrt{b} + 63{,}00$
	$\varphi_f = m_n + 0{,}1\sqrt{d}$ m_n (mm), d (mm)	b (mm)



Tolerancije kružnog toka T_r

Kvalitetni razred	T_r (µm)	Kvalitetni razred	T_r (µm)
1	$0{,}224\,\varphi_p + 3{,}00$	7	$3{,}15\,\varphi_p + 40{,}00$
2	$0{,}355\,\varphi_p + 4{,}50$	8	$4{,}00\,\varphi_p + 50{,}00$
3	$0{,}56\,\varphi_p + 7{,}00$	9	$5{,}00\,\varphi_p + 63{,}00$
4	$0{,}90\,\varphi_p + 11{,}00$	10	$6{,}30\,\varphi_p + 80{,}00$
5	$1{,}40\,\varphi_p + 18{,}00$	11	$8{,}00\,\varphi_p + 100{,}00$
6	$2{,}24\,\varphi_p + 28{,}00$	12	$10{,}00\,\varphi_p + 125{,}00$

$\varphi_p = m_n + 0{,}25\sqrt{d}$ m_n (mm), d (mm)

Tolerancije pri tangencijalnoj kontroli zahvatom

tj. pri kontroli zahvatom u etalonski zupčanik s konstantnim nazivnim razmakom osi. (Registriramo odstupanja stvarnog kuta rotacije gonjenog zupčanika.)

A_i' – odstupanje s obzirom na 1 okretaj
$\Delta A_i'$ – odstupanje s obzirom na 1 korak

– tolerancija odstupanja $T_i' = TT_{to} + T_{ev}$
– tolerancija porasta odstupanja $\Delta T_i' = A_{to,g} + T_{ev}$

Tolerancije pri radijalnoj kontroli zahvatom

tj. pri kontroli zahvatom u etalonski zupčanik bez bočne zračnosti – što postižemo elastičnim radijalnim pritiskanjem zupčanika na etalonski zupčanik stalnom silom. (Registriramo odstupanja razmaka osi.)

A_i'' – odstupanje s obzirom na 1 okretaj
$\Delta A_i''$ – odstupanje s obzirom na 1 korak

Kvalitetni razred	T_i'' (µm)	$\Delta T_i''$ (µm)
1	$0{,}32\,\varphi_p + 4{,}00$	$0{,}16\,\varphi_p + 2{,}00$
2	$0{,}50\,\varphi_p + 6{,}00$	$0{,}224\,\varphi_p + 3{,}00$
3	$0{,}80\,\varphi_p + 10{,}00$	$0{,}32\,\varphi_p + 4{,}00$
4	$1{,}25\,\varphi_p + 16{,}00$	$0{,}45\,\varphi_p + 6{,}00$
5	$2{,}00\,\varphi_p + 25{,}00$	$0{,}56\,\varphi_p + 9{,}00$
6	$3{,}20\,\varphi_p + 40{,}00$	$0{,}90\,\varphi_p + 12{,}00$
7	$4{,}50\,\varphi_p + 56{,}00$	$1{,}25\,\varphi_p + 16{,}00$
8	$5{,}60\,\varphi_p + 71{,}00$	$1{,}80\,\varphi_p + 22{,}00$
9	$7{,}10\,\varphi_p + 90{,}00$	$2{,}24\,\varphi_p + 28{,}00$
10	$9{,}00\,\varphi_p + 112{,}00$	$2{,}80\,\varphi_p + 36{,}00$
11	$11{,}20\,\varphi_p + 140{,}00$	$3{,}55\,\varphi_p + 45{,}00$
12	$14{,}00\,\varphi_p + 180{,}00$	$4{,}50\,\varphi_p + 56{,}00$
	$\varphi_p = m_n + 0{,}25\sqrt{d}$	m_n (mm), d (mm)

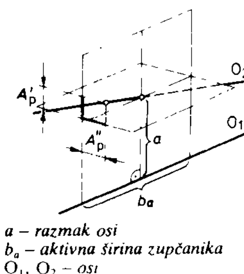
Tolerancija paralelnosti osi

Inklinacija osi A_p' je komponentno odstupanje paralelnosti osi u ravnini, koja je određena jednom osi i okomicom na nju do druge osi.

Dozvoljena inklinacija $T_p' = T_\beta$

Devijacija osi A_o'' je komponentno odstupanje paralelnosti osi u ravnini, koja je paralelna s jednom osi i okomita na inklinacijsku ravninu.

Dozvoljena devijacija $T_p'' = T_\beta/2$



a – razmak osi
b_a – aktivna širina zupčanika
O_1, O_2 – *osi*

Tolerancije za mjeru pomoću zubaca označujemo dvama slovima iz niza j...r', od kojih označuje

prvo – gornje granično odstupanje $A_{W.g}$
drugo – donje granično odstupanje $A_{W.d}$

Odstupanja dobivamo tako da gornje granično odstupanje koraka $A_{t0.g}$ pomnožimo slijedećim koeficijentima:

niz	j	h	g	f	e	d	c	b	a
koeficijent	+1	0	−2	−4	−6	−8	−10	−12	−14
niz	z'	y'	x'	w'	v'	u'	t'	s'	r'
koeficijent	−18	−22	−26	−30	−34	−38	−42	−46	−50

Primjer označivanja kvalitete tolerancije za mjeru pomoću zubaca: npr. 5 fa.

Granična odstupanja razmaka osi

Odstupanje razmaka osi A_a je algebarska razlika između stvarnog i nazivnog razmaka osi.

Kvalitetni razred	Gornje odstupanje $A_{a,g}$ (μm)	Kvalitetni razred	Gornje odstupanje $A_{a,g}$ (μm)
1	0,5 IT 4	4	0,5 IT 8
2	0,5 IT 6	5	0,5 IT 9
3	0,5 IT 7	6	0,5 IT 11

Donje odstupanje: $A_{a,d} = -A_{a,g}$

Kružna zračnost

– za zupčanike s ravnim zupcima

$$j_{max} = -(A_{W1,d} + A_{W2,d})/\cos\alpha_W + 2A_{a,g}\tan\alpha_W$$
$$j_{min} = -(A_{W1,g} + A_{W2,g})/\cos\alpha_{Wt} + 2A_{a,d}\tan\alpha_{Wt}$$

– za zupčanike s kosim zupcima

$$j_{max} = -\frac{A_{W1,d} + A_{W2,d}}{\cos\alpha_{Wt}\cos\beta_b} + 2A_{a,g}\tan\alpha_{Wt}$$

$$j_{min} = -\frac{A_{W1,g} + A_{W2,g}}{\cos\alpha_{Wt}\cos\beta_b} + 2A_{a,d}\tan\alpha_{Wt}$$

Da spriječimo interferenciju (istodobno prekrivanje) zubnih bokova, mora biti

$$j_{min} > 2(T_{i1}'' + T_{i2}'')\tan\alpha_{wt}$$

Orijentacijske vrijednosti za kružnu zračnost u ovisnosti o standardnom modulu m_n

$$j = k(m_n + 1) \qquad m_n\ (mm) \quad j\ (\mu m)$$

pri čemu faktor k iznosi:

$k = 26\ldots38$ – bez posebnih zahtjeva
$k = 18\ldots32$ – za alatne strojeve
$k = 18\ldots50$ – u automobilskoj industriji

Izbor kvaliteta tolerancije zupčanika

Kvalitet tolerancije zupčanika odabiremo s obzirom na upotrebu, obodnu brzinu i način obrade.

Izbor s obzirom na upotrebu

Upotreba	Kvalitet tolerancije 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
etalonski zupčanici												
precizni instrumenti												
precizni prigoni												
automobili												
kamioni												
opće strojarstvo												
grubi strojevi												

Izbor s obzirom na obodnu brzinu

Obodna brzina (m/s)	Kvalitet tolerancije 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
> 20												
20...6												
6...3												
< 3												

Izbor s obzirom na način obrade

Način obrade	Kvalitet tolerancije 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
brušenje												
brijanje												
precizno odvajanje čestica												
osrednje odvajanje čestica												
obično odvajanje čestica												

Razred površinske obrade (orijentacijski)

Standardni modul m_n (mm)	Kvalitet tolerancije 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1... 2												
2... 4												
4... 6	4	5			6							
6... 8							7		8			
8...10										9		10
10...16												11
16...20												

Proračun čvrstoće čelnika (po DIN 3990)

P r v i p r o r a č u n – za osnovu

Za poznati okretni moment na pogonskom zupčaniku T_1 izračunavamo:
– promjer diobene kružnice pogonskog zupčanika

$$d_1 \geqq \sqrt{2\frac{T_1}{b_k} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot \frac{S_{H\,min}}{\sigma_{H\,lim}}} Z_M \cdot Q_H$$

– modul

$$m \geqq 2\frac{T_1}{b_k d_1} \cdot \frac{S_{F\,min}}{\sigma_{F\,lim}} Y_F \cdot Q_F$$

gdje su:

b_k – širina korisnog dijela boka zupca
i – prijenosni omjer
$S_{H\,min}$ – najmanji koeficijent sigurnosti s obzirom na jamičenje ($\geqq \sqrt{1,4}$)
$S_{F\,min}$ – najmanji koeficijent sigurnosti s obzirom na trajni lom ($\geqq 1,7$)
$\sigma_{H\,lim}$ – dinamička čvrstoća za bočni tlak (Hertzov tlak)

Materijal	Tvrd. HV	$\sigma_{H\,lim}$ (N/mm²)
čelik za cementiranje	650...750	1450...1650
čelik za poboljšanje, nelegiran	140...200	500...610
legiran	200...400	1,25 HV + (245...355)
čelični lijev, legiran	200...400	1,10 HV + (210...310)

$\sigma_{F\,lim}$ – dinamička čvrstoća za naprezanje u korijenu zupca

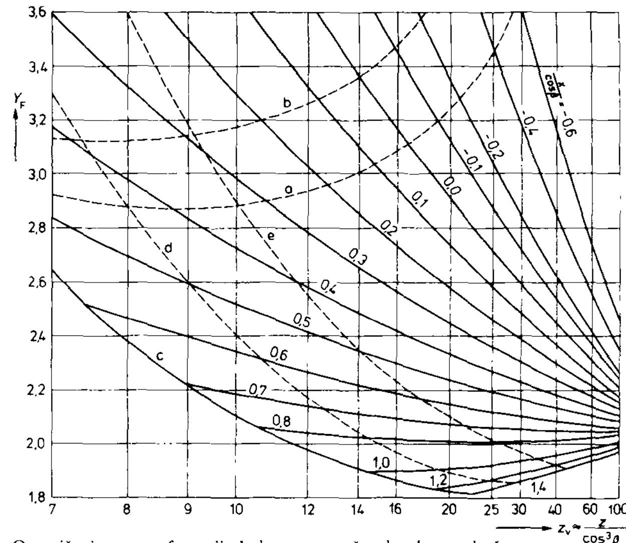
Materijal	Tvrd. HV	$\sigma_{H\,lim}$ (N/mm²)
čelik za cementiranje	650...750	350...500
čelik za poboljšanje, nelegiran	140...200	0,67 HV + (55...115)
legiran	200...400	0,43 HV + (115...195)
čelični lijev, legiran	200...400	0,40 HV + (40...120)

Z_M – karakteristika materijala

$$Z_M = \sqrt{\frac{2}{\pi\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}}$$

Kombinacije materijala	Z_M ($\sqrt{N/mm^2}$)
čelik – čelik	268
čelik – čelični lijev	267
čelik – sivi lijev	234
čelik – bronca	219

Y_F – koeficijent oblika zupca (ovisi o broju zubaca z, kutu nagiba bočne linije β_0 i koeficijentu pomaka profila osnovne ozubnice x)



Ograničenje za interferenciju bokova: a – računsko; b – praktično
Ograničenje za šiljasti vrh: c: $s_k = 0$; d: $s_k = 0,2\ m_n$; e: $s_k = 0,4\ m_n$

Q_H, Q_F – korekcijski faktori		Točno ozupčanje	Grubo ozupčanje
$Q_H = \frac{Q_{HA}\,Q_{HB}}{Q_{HD}}$	Q_{HA}	> 1	> 1
	Q_{HB} $\beta = 0°$ [1]	1,45...1,50	1,77
	Q_{HB} $\beta \approx 30°$ [1]	1,20...1,30	1,77
	Q_{HD}	0,80...1,20	0,5...1
$Q_F = \frac{Q_{FA}\,Q_{FB}}{Q_{FD}}$	Q_{FA} ($\leqq Q_{HA}$)	> 1	> 1
	Q_{FB}	0,55...0,75	1
	Q_{FD} $\varrho_f \geqq 0,25\ m$ [1,2]	≈ 1	≈ 1
	Q_{FD} $\varrho_f < 0,25\ m$ [1,3]	< 1	< 1

[1] β_0 – kut nagiba bočne linije, ϱ_f – zaobljenost u korijenu. – [2] Ako u prijelaznim dijelovima bokova zupca nema zareza. – [3] Ako su u prijelaznim dijelovima bokova zupca zarezi (npr. stepenica pri bušenju).

Kontrola podataka iz prvog proračuna

Koeficijenti sigurnosti moraju biti:

— s obzirom na jamičenje

$$S_H = \frac{d_{01}}{\sqrt{2\,\frac{T_1}{b_k}\cdot\frac{i+1}{i}}}\cdot\frac{\sigma_{H\,lim}}{Z_M}\cdot\frac{1}{Q_H'} > S_{H\,min}$$

— s obzirom na trajni lom

$$S_F = \frac{m}{2\,\frac{T_1}{b_k\,d_{01}}}\cdot\frac{\sigma_{F\,lim}}{Y_F}\cdot\frac{1}{Q_F'} > S_{F\,min}$$

pri čemu su:

$$\frac{1}{Q_H'} = \frac{Z_v\,Z_R}{Z_H\,Z_\varepsilon}\cdot\frac{K_L\,K_{Hx}}{\sqrt{K_I\,K_v\,K_{H\alpha}\,K_{H\beta}}}$$

$$\frac{1}{Q_F'} = \frac{Y_s}{Y_\beta\,Y_\varepsilon}\cdot\frac{K_{Fx}}{K_I\,K_v\,K_{F\alpha}\,K_{F\beta}}$$

dok pojedini (bezdimenzijski) koeficijenti iznose:[1)]

Z_v — koeficijent brzine (≈ 1)*

Z_R — koeficijent hrapavosti ($= 0{,}8 \ldots 1$)*

Z_H — koeficijent oblika boka župca

$$Z_H = \sqrt{\frac{\cos\beta_b}{\tan\alpha}\cdot\frac{1}{\cos\alpha}}$$

α — kut zahvata

β_b — kut zavojnice na osnovnom valjku

Z_ε — koeficijent zahvata

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\left[\frac{4-\varepsilon_p}{3}(1-\varepsilon_q) + \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_p}\right]\cos\beta_b}$$

$$\varepsilon_p = \frac{z_1}{2}\,[\tan\alpha_{k1} + i\tan\alpha_{k2} - (i+1)\tan\alpha]$$

$$\tan\alpha_k = \sqrt{(d_k/d_b)^2 - 1}$$

$$\varepsilon_q = \frac{b_A\sin\beta_0}{m_n\pi}$$

d_k — promjer tjemenog valjka

d_b — promjer osnovnog valjka

b_A — širina aktivnog dijela bokova zupca

Y_s — koeficijent zareza (≈ 1)*

Y_β — koeficijent nagiba zupca $\quad Y_\beta = 1 - \beta_0/120 \geqq 0{,}75$

Y_ε — koeficijent razdiobe sile $\quad Y_\varepsilon = 1/\varepsilon_p$

---

1) Vrijednosti označene zvijezdicom * samo su orijentacijske.

K_L — koeficijent maziva ($= 0{,}82 \ldots 1{,}1$)*

K_{Hx} — veličinski koeficijent (≈ 1)*

K_{Fx} — veličinski koeficijent (≈ 1)*

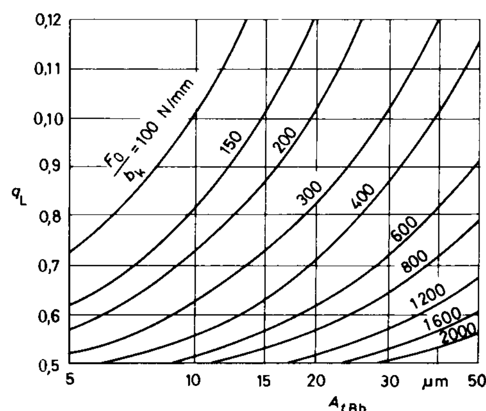
K_I — koeficijent udarnog opterećenja

		Rad radnog stroja		
		jednoliki	nejednoliki	udarni
Rad pogonskog stroja	jednoliki	1,00	1,25	1,75
	nejednoliki	1,10	1,35	1,80
	udarni	1,25	1,50	1,85

K_v — dinamički koeficijent (≈ 1)*

$K_{H\alpha}$ — koeficijent razdiobe sile u ravnini profila

$$K_{H\alpha} = 1 + 2\,(1/Z_\varepsilon^2 - 1)\,(q_L - 0{,}5)$$



$K_{F\alpha}$ — koeficijent razdiobe sile u ravnini profila

$$K_{F\alpha} = 1 + 2\,(\varepsilon_p - 1)\,(q_L - 0{,}5)$$

$K_{H\beta}$ — koeficijent razdiobe sile po širini zupca

$$K_{H\beta} = 1{,}5\,b_k/b_A$$

$K_{F\beta}$ — koeficijent razdiobe sile po širini zupca

pri jednolikoj razdiobi opterećenja

$$K_{F\beta} \approx (1 + K_{H\beta})/2 \qquad 1 < K_{H\beta} < 2$$

pri nejednolikoj razdiobi opterećenja

$$1 < K_{F\beta} \leqq 0{,}75\,K_{H\beta} \qquad K_{H\beta} = 2\,b_k/b_A$$

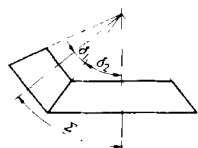
Parovi stožnika (DIN 3971 – 1980)

Prijenosni omjer je

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

gdje su: n_1 i n_2 – brzine vrtnje pogonskog i gonjenog zupčanika, z_1 i z_2 – brojevi zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika.

Kutovi kinematičkih stožaca δ_1 i δ_2 ovise o prijenosnom omjeru i te o kutu među osima $\Sigma = \delta_1 + \delta_2$:

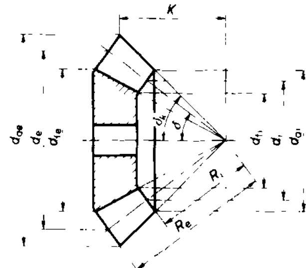


$$\delta_1 = \text{arc tan}\,\frac{\sin\Sigma}{i + \cos\Sigma}$$

$$\delta_2 = \text{arc tan}\,\frac{i\sin\Sigma}{1 + i\cos\Sigma}$$

$$\frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_1} = i = \frac{z_2}{z_1}$$

Mjere stožnika



Promjeri kinematičkih kružnica:

vanjski $d_e = 2R_e \sin\delta$

nutarnji $d_i = 2R_i \sin\delta$

gdje su duljine izvodnice stošca:

R_e – vanjska, R_i – unutarnja

$$R_e = \frac{d_e}{2\sin\delta} = \frac{z\,m_{te}}{2\sin\delta}$$

Promjeri tjemenih kružnica:

$d_{ae} = d_e + 2h_{ae}\cos\delta$

$d_{ai} = d_i + 2h_{ai}\cos\delta$

Promjeri korijenskih kružnica:

$d_{fe} = d_e - 2h_{fe}\cos\delta$

$d_{fi} = d_i - 2h_{fi}\cos\delta$

$h_{ke}(h_{fe})$ i $h_{ki}(h_{fi})$ su visine vrha (odn. korijena) zubaca za vanjske i nutarnje duljine izvodnice stošca.

Udaljenost vanjske tjemene kružnice

$$K = R_e\cos\delta - h_{ae}\sin\delta = d_e/2 \cdot \cot\delta - h_{ae}\sin\delta$$

Kut tjemenog stošca $\delta_a = \delta + \vartheta_a$ $\quad \vartheta_a = \text{arc tan}\,(h_{ae}/R_e)$

Kut podnožnog stošca $\delta_f = \delta - \vartheta_f$ $\quad \vartheta_f = \text{arc tan}\,(h_{fe}/R_e)$

Korak – kutni $\tau = 2\pi/z$ $\quad \tau_1/\tau_2 = z_2/z_1 = i$

– lučni $p_t = \tau d/2 = d\pi/z = m_t\pi$

Modul $m_t = p_t/\pi = d/z$

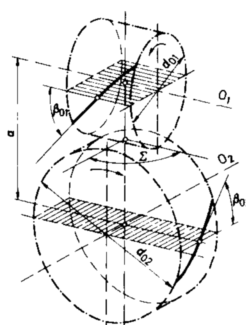
Parovi hiperboloidnih zupčanika

Evolventni hiperboloidni parovi zupčanika

Prijenosni omjer je

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

gdje su: n_1 i n_2 — brzine vrtnje pogonskog i gonjenog zupčanika, z_1 i z_2 — brojevi zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika.



Kut među osima iznosi

$$\Sigma = \beta_{01} + \beta_{02}$$

gdje su β_{01} i β_{02} — kutovi nagiba bočnih linija u pogonskog i gonjenog zupčanika.

Promjeri diobenih kružnica:

— pogonskog zupčanika

$$d_{01} = \frac{z_1 m_n}{2\cos\beta_{01}}$$

— gonjenog zupčanika

$$d_{02} = \frac{z_2 m_n}{2\cos\beta_{02}}$$

Za kut među osima $\Sigma = \beta_{01} + \beta_{02} = 90^\circ$ iznose:

— *razmak osi a*

$$a = \frac{d_{01} + d_{02}}{2} = \frac{m_n}{2}\left(\frac{z_1}{\cos\beta_{01}} + \frac{z_2}{\cos\beta_{02}}\right)$$

$$a = \frac{z_1 m_n}{2}\left(\frac{1}{\cos\beta_{01}} + \frac{i}{\sin\beta_{01}}\right)$$

— *kutovi nagiba bočne linije* β_{01} *i* β_{02}

$$\left.\begin{array}{l}\tan\beta_{01} \geqq \sqrt[3]{i}\\ \beta_{02} = 90^\circ - \beta_{01}\end{array}\right\}\text{ako je}\quad \frac{1}{\cos\beta_{01}} + \frac{i}{\sin\beta_{01}} = \frac{2a}{z_1 m_n}$$

— *razmak osi* za prijenosni omjer $i = 1$

$$a = \frac{z_1 m_n}{\sin 2\beta_{01}}(\sin\beta_{01} + \cos\beta_{01})$$

pri čemu je

$$\sin\beta_{01} = \frac{1}{2K^2}\left(1 + \sqrt{1 + 4K^2}\right)$$

$$K = a/z_1 m_n$$

Cilindrični pužni prijenos (ISO)
(DIN 3975 - 1976)

S obzirom na oblik bokova zubaca pužnog vijka, koji je ovisan o postupku obrade, razlikuju se parovi cilindričkog pužnog prijenosa ZA (oblika bokova A), ZN (oblika bokova N), ZI (oblika bokova I) i ZK (oblika bokova K).

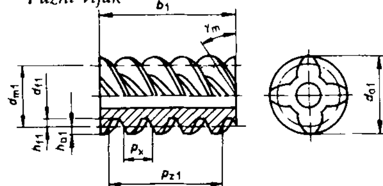
Prijenosni omjer je
$$i = n_1/n_2 = z_2/z_1$$
pri čemu su: n_1 i n_2 – brzine vrtnje pužnog vijka i pužnog kola, z_1 i z_2 – brojevi zubaca pužnog vijka i pužnog kola.

Kut među osima Σ je po volji; obično je $\Sigma = 90°$.

Moduli m (mm):

1	1,25	1,5	2	2,5	3	4
5	6	8	10	12	16	20

Pužni vijak



Promjer središnjeg valjka
$$d_{m1} = m\,q$$

Pužna karakteristika q:

1. prednost:	8	10	12	16	20
2. prednost:	7	9	11	14	18

Kut središnje zavojnice
$$\gamma_m = \text{arc tan}\,(z_1/q) = \text{arc tan}\,(m\,z_1/d_{m1})$$

Osni korak
$$p_x = m\,\pi$$

Debljina zupca (širina međuzublja) na središnjem valjku u ravnini presjeka kroz os
$$s_{mx} = e_{mx} = m\,\pi/2$$

Korak zavojnice
$$p_{z1} = z_1\,p_x = z_1\,m\,\pi$$

Visina zupčanog vrha
$$h_{a1} = m$$

U posebnim slučajevima može visina vrha zupca biti nešto veća ili manja od m.

Visina korijena zupca
$$h_{f1} = m(1 + c_1)$$
pri čem je $c_1 = 0,1 \ldots 0,3$ ($c_1 \approx 0,2$).

Promjer tjemenog valjka
$$d_{a1} = d_{m1} + 2\,h_{a1}$$

Promjer podnožnog valjka
$$d_{f1} = d_{m1} - 2\,h_{f1}$$

Pužno kolo

Promjer diobene kružnice $d_2 = z_2\,m$

Korak $p_2 = m\,\pi = d_2\,\pi/z_2 = p_x$

Promjer tjemene kružnice
$$d_{a2} = d_2 + 2\,m(1 + x)$$

Promjer tjemenog valjka
$$d_{e2} = d_{a2} + m$$

Promjer anuloidne kružnice
$$r_K = a - (d_{a2}/2)$$

Promjer podnožne kružnice
$$d_{f2} = d_{a2} - 2\,m(2 + c_2)$$

Visina zupca
$$h_2 = h_{a2} + h_{f2}$$

Visina zupčanog vrha
$$h_{a2} = m(1 + x)$$

Visina zupčanog korijena
$$h_{f2} = m(1 - x + c_2)$$

pri čem su: $c_2 = 0,1 \ldots 0,3$ ($c_2 \approx 0,2$); x – koeficijent pomaka profila.

Razmak osi $a = 0,5(d_{m1} + d_2) + x\,m$

*

Izbor veličina za pužni prijenos

Broj zubaca pužnog vijka z_1 i mehanička korisnost η_m ovise o prijenosnom omjeru i:

i	5...10	10...15	15...30	> 30
z_1	4	3	2	1
η_m	0,78...0,90	0,75...0,88	0,65...0,85	0,55...0,80

Okretni moment na pužnom kolu T_2 proizlazi iz okretnog momenta na pužnom vijku T_1, prijenosnog omjera i i mehaničke korisnosti η_m
$$T_2 = i\,T_1\,\eta_m$$

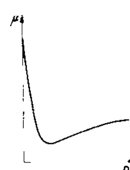
Modul procjenjujemo prema jednadžbi
$$m \approx 0,43\,\sqrt[3]{\frac{T_2}{p\,z_2}} \qquad m\ \text{(mm)},\ T_2\ (\text{N} \cdot \text{mm}),\ p\ (\text{N/mm}^2)$$

pri čemu ocjenjujemo bočni pritisak s obzirom na materijal pužnog kola:

materijal	p (N/mm^2)
sivi lijev	2...3
bakrene slitine s kositrom	5...8
aluminijske slitine	4...7

Promjer središnjeg valjka pužnog vijka d_m ocjenjujemo s obzirom na modul m i broj zubaca pužnog vijka z_1: za puni pužni vijak $d_m \approx 2\,m\,(1,4 + 2\sqrt{z_1})$
za navučeni pužni vijak $d_m \approx 2\,m\,(5,3 + 0,1\,z_1)$
a zatim ga odabiremo s obzirom na $d_m = m\,q$ (str. 574).

Klizni ležaji



U stanju mirovanja klizne se plohe rukavca i blazinice ležaja dodiruju neposredno. Zbog toga se u početku pogona pojavljuje »suho trenje« s razmjerno velikim koeficijentom trenja $\mu = 0{,}1 \ldots 0{,}2$. U tom je stanju potrebno ulje utiskivati pod tlakom u ležaj.

Kako se brzina vrtnje n povećava, stvara se između rukavca i blazinice uljni film i podmazivanje prelazi postupno u hidrodinamičko, u kojem se koeficijent trenja snizuje na $\mu = 0{,}005 \ldots 0{,}01$ (a zatim s povećanjem brzine vrtnje opet raste).

Prosječni pritisak p_{med} u ležaju je

$$p_{med} = F/d\,l$$

gdje su: F – sila, koja djeluje okomito na ležaj, d – promjer rukavca, l – nosiva duljina rukavca: $l = (0{,}5 \ldots 1)\,d$.

Prosječni pritisak p_{med} za različite materijale blazinica približno je u slijedećim granicama:

materijal	p_{med} (N/mm²)	materijal	p_{med} (N/mm²)
bijela kovina	5 ... 15	sivi lijev	≦ 0,8
olovna bronca	15 ... 35	guma (u vodi)	≦ 0,4

Relativna zračnost ψ u ležaju, potrebna za nastajanje uljnog filma, iznosi

$$\psi = (D - d)/d$$

gdje su: D – promjer blazinice, d – promjer rukavca.

Relativna zračnost ψ ovisi o prosječnom pritisku p_{med} i brzini vrtnje n. Vrijednosti relativne zračnosti vide se u slijedećoj tablici:

Brzina vrtnje n	Relativna zračnost ψ malen p_{med}	velik p_{med}
malena	$(0{,}7 \ldots 1{,}2)\,10^{-3}$	$(0{,}3 \ldots 0{,}6)\,10^{-3}$
velika	$(2 \ldots 3)\,10^{-3}$	$(1{,}5 \ldots 2{,}5)\,10^{-3}$

Uzimajući u obzir različite koeficijente temperaturnog rastezanja, preporučljivo je odabrati slijedeće relativne zračnosti prema materijalu blazinice:

materijal	ψ	materijal	ψ
bijela kovina	$(0{,}5 \ldots 1)\,10^{-3}$	sinterovano željezo	$(1{,}5 \ldots 2)\,10^{-3}$
olovna bronca	$(1 \ldots 1{,}5)\,10^{-3}$	umjetne tvari	$(3 \ldots 4)\,10^{-3}$
aluminijske slitine	$(2 \ldots 3)\,10^{-3}$		

Toplina trenja

Toplinski tok Φ, koji nastaje zbog trenja pri obodnoj brzini rukavca v, iznosi

$$\Phi = \mu F v,$$

a prelazi uglavnom na mazivo, zbog čega se mazivo mora hladiti.

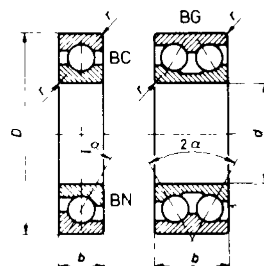
Kuglični ležaji

Nizovi BC, BN i BG
(JUS M.C3.601/611/621 – 1966)

Niz BC: jednoredni kuglični ležaji, obični ($\alpha = 0$, vidi str. 597)

Niz BN: jednoredni kuglični ležaji, s kosim dodirom

Niz BG: dvoredni kuglični ležaji, s kosim dodirom



Jednoredni kuglični ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	r	Nosivost (kN) C_o	C
Niz BC 10					
10 BC 10	10	26	0,5	1,9	3,4
12	12	28	0,5	2,2	3,75
15	15	32	0,5	2,55	4,2
17 BC 10	17	35	0,5	2,85	4,5
20	20	42	1	4,5	6,95
25	25	47	1	5	7,5
30 BC 10	30	55	1,5	7	10
35	35	62	1,5	8,6	12
40	40	68	1,5	9,4	12,7
45 BC 10	45	75	1,5	12,4	16,3
50	50	80	1,5	13,3	17
55	55	90	2	17,3	22
60 BC 10	60	95	2	19,3	22,8
65	65	100	2	21,2	24
70	70	110	2	24,5	30
75 BC 10	75	115	2	26,6	31,5
80	80	125	2	32	37,5
85	85	130	2	34	39
90 BC 10	90	140	2,5	40	45,5
95	95	145	2,5	43	48
100	100	150	2,5	43	48
105 BC 10	105	160	3	56,5	57
110	110	170	3	59	64
120	120	180	3	62,5	67
Niz BC 02					
10 BC 02	10	30	1	1,98	3,4
12	12	32	1	3	5,3
15	15	35	1	3,6	5,85

Jednoredni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	r	Nosivost (kN) C_o	C
Niz BC 02						
17 BC 02	17	40	12	1,5	4,4	7,2
20	20	47	14	1,5	6,55	9,8
25	25	52	15	1,5	7,1	10,4
30 BC 02	30	62	16	1,5	10	14,6
35	35	72	17	2	13,7	19,6
40	40	80	18	2	16	22,4
45 BC 02	45	85	19	2	18,3	25
50	50	90	20	2	21	27
55	55	100	21	2,5	26	32,5
60 BC 02	60	110	22	2,5	32	40
65	65	120	23	2,5	35,5	44
70	70	125	24	2,5	39	46,5
75 BC 02	75	130	25	2,5	42,5	50
80	80	140	26	3	45,5	55
85	85	150	28	3	55	63
90 BC 02	90	160	30	3	63	71
95	95	170	32	3,5	72	80
100	100	180	34	3,5	81,5	90
Niz BC 03						
10 BC 03	10	35	11	1	3,6	6,55
12	12	37	12	1,5	4,3	8
15	15	42	13	1,5	5,2	8,8
17 BC 03	17	47	14	1,5	6,3	10,4
20	20	52	15	2	7,65	12,5
25	25	62	17	2	10,4	16,6
30 BC 03	30	72	19	2	14,6	22
35	35	80	21	2,5	17,6	26
40	40	90	23	2,5	22	31,5
45 BC 03	45	100	25	2,5	30	40,5
50	50	110	27	3	35,5	47,5
55	55	120	29	3	42,5	54
60 BC 03	60	130	31	3,5	48	61
65	65	140	33	3,5	55	69,5
70	70	150	35	3,5	63	78
75 BC 03	75	160	37	3,5	72	85
80	80	170	39	3,5	80	93
85	85	180	41	4	88	102
90 BC 03	90	190	43	4	98	110
95	95	200	45	4	112	120
100	100	215	47	4	132	137
Niz BC 04						
17 BC 04	17	62	17	2	12,1	19,3
20	20	72	19	2	16,9	26
25	25	80	21	2,5	19,7	29
30	30	90	23	2,5	24,3	34,5

Jednoredni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	r	Nosivost (kN) C_o	C
Niz BC 04						
35 BC 04	35	100	25	2,5	31,5	43
40	40	110	27	3	37,5	51,5
45	45	120	29	3	47	61,2
50 BC 04	50	130	31	3,5	53	70
55	55	140	33	3,5	63	79
60	60	150	35	3,5	71	86
65 BC 04	65	160	37	3,5	79,5	90
70	70	180	42	4	106	118
75	75	190	45	4	116	127
80 BC 04	80	200	48	4	127	137
85	85	210	52	5	138	143
90	90	225	54	5	148	153

Jednoredni kuglični ležaji s kosim dodirom

Oznaka	Dimenzije (mm) d, D, b	Nosivost (kN) C_o	C	Oznaka	Dimenzije (mm) d, D, b	Nosivost (kN) C_o	C
Niz BN 02				*Niz BN* 03			
15 BN 02	kao kod niza BC 02	4,15	6,2	17 BN 03	kao kod niza BC 03	7,8	11,8
17		5,3	7,65	20		9,3	13,7
20		7,35	10,4	25		14,3	19,6
25 BN 02		8,8	11,6	30 BN 03		19,3	25
30		12,7	16,3	35		23,2	30
35		17,3	21,6	40		29	35,5
40 BN 02		21,2	26	45 BN 03		39	46,5
45		24,5	29	50		45,5	54
50		26,5	30,5	55		54	62
55 BN 02		33,5	38	60 BN 03		62	69,5
60		41,5	45,5	65		72	78
65		49	51	70		83	88
70 BN 02		53	56	75 BN 03		93	96,5
75		57	58,5	80		104	106
80		64	65,5	85		116	116
85 BN 02		73,5	72	90 BN 03		129	127
90		86,5	85	95		143	137
95		100	95	100		170	156
100		106	102				
105 BN 02	d = 105 D = 190 b = 36	120	112	105 BN 03	d = 105 D = 225 b = 49	186	170
110 BN 02	d = 110 D = 200 b = 38	134	122	110 BN 03	d = 110 D = 240 b = 50	216	190

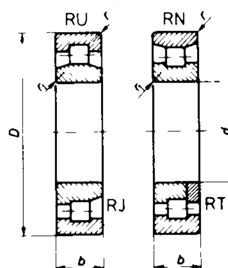
Dvoredni kuglični ležaji (s kosim dodirom)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	r	Nosivost (kN) C_0	C
Niz BG 32						
10 BG 32	10	30	14,0	1	4,55	6,95
12	12	32	15,9	1	5,6	7,8
15	15	35	15,9	1	5,6	7,8
17 BG 32	17	40	17,5	1,5	8,5	11
20	20	47	20,6	1,5	11	15,3
25	25	52	20,6	1,5	13,7	17,3
30 BG 32	30	62	23,8	1,5	20,4	25
35	35	72	27,0	2	28	33,5
40	40	80	30,2	2	32,5	38
45 BG 32	45	85	30,2	2	37,5	42,5
50	50	90	30,2	2	43	47,5
55	55	100	33,3	2,5	49	54
60 BG 32	60	110	36,5	2,5	63	66,5
65	65	120	38,1	2,5	69,5	71
70	70	125	39,7	2,5	71	71
75 BG 32	75	130	41,3	2,5	80	78
80	80	140	44,4	3	96,5	95
85	85	150	49,2	3	106	102
90 BG 32	90	160	52,4	3	127	118
95	95	170	55,6	3,5	150	137
100	100	180	60,3	3,5	160	146
Niz BG 33						
15 BG 33	15	42	19,0	1,5	9,3	13,7
17	17	47	22,2	1,5	12,9	18,6
20	20	52	22,2	2	14	18,6
25 BG 33	25	62	25,4	2	20	26
30	30	72	30,2	2	27	34,5
35	35	80	34,9	2,5	36	43
40 BG 33	40	90	36,5	2,5	45,5	55
45	45	100	39,7	2,5	56	65,5
50	50	110	44,4	3	73	80
55 BG 33	55	120	49,2	3	80	86,5
60	60	130	54,0	3,5	96,5	100
65	65	140	58,7	3,5	112	114
70 BG 33	70	150	63,5	3,5	129	132
75	75	160	68,3	3,5	140	137
80	80	170	68,3	3,5	160	156
85 BG 33	85	180	73,0	4	180	173
90	90	190	73,0	4	212	196
95	95	200	77,8	4	240	216
100 BG 33	100	215	82,6	4	265	236
105	105	225	87,3	4	300	255
110	110	240	92,1	4	320	275

Valjkasti ležaji

Nizovi RU, RN, RJ, RT, RA in RD-K

(JUS M.C3.631/632/635/636/637/641/642 – 1966)

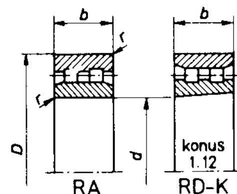


Niz RU: u oba smjera aksijalno pomični ležaji s vodećim vanjskim prstenom*

Niz RN: u oba smjera aksijalno pomični ležaji s vodećim unutarnjim prstenom*

Niz RJ: u jednom smjeru aksijalno pomični ležaji s vodećim vanjskim prstenom*

Niz RT: aksijalno nepomični ležaji*



Niz RA: u oba smjera aksijalno pomični dvoredni ležaji s vodećim vanjskim prstenom*

Niz RD-K: u oba smjera aksijalno pomični dvoredni ležaji s vodećim nutarnjim prstenom i koničnom rupom*

* Za sve nizove je $\alpha = 0$ (vidi str. 597).

Jednoredni valjkasti ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	r	r_1	Nosivost (kN) C_0	C
Niz RU 10							
25 RU 10	25	47	12	1	0,5	7,5	10
30	30	55	13	1,5	0,8	10,4	13,2
35	35	62	14	1,5	0.8	13,2	16
40 RU 10	40	68	15	1,5	1	15,3	18,6
45	45	75	16	1,5	1	18,6	22,4
50	50	80	16	1.5	1	21,2	24
55 RU 10	55	90	18	2	1,5	24	27,5
60	60	95	18	2	1,5	25	28,5
65	65	100	18	2	1,5	26,5	29
70 RU 10	70	110	20	2	1,5	37,5	42,5
75	75	115	20	2	1,5	39	44
80	80	125	22	2	1,5	47,5	53
85 RU 10	85	130	22	2	1,5	55	58,5
90	90	140	24	2,5	2	60	65,5
95	95	145	24	2.5	2	63	68
100 RU 10	100	150	24	2.5	2	65,5	69,5
110	110	170	28	3	2	93	102
120	120	180	28	3	2	102	110

Oznaka	Dimenzije (mm)					Nosivost (kN)	
	d	*D*	*b*	*r*	r_1	C_o	*C*
Niz RU 02							
20 RU 02	20	47	14	1,5	1	8	11,8
25	25	52	15	1,5	1	9,65	13,2
30	30	62	16	1,5	1	12,9	17,6
35 RU 02	35	72	17	2	1	18,6	25,5
40	40	80	18	2	2	24,5	33,5
55	45	85	19	2	2	27	34,5
50 RU 02	50	90	20	2	2	29	36,5
55	55	100	21	2,5	2	34,5	44
60	60	110	22	2,5	2,5	41,5	53
65 RU 02	65	120	23	2,5	2,5	49	62
70	70	125	24	2,5	2,5	52	64
75	75	130	25	2,5	2,5	61	75
80 RU 02	80	140	26	3	3	69,5	85
85	85	150	28	3	3	80	98
90	90	160	30	3	3	93	118
95 RU 02	95	170	32	3,5	3,5	110	137
100	100	180	34	3,5	3,5	122	153
Niz RU 03							
20 RU 03	20	52	15	2	1	10,6	16,6
25	25	62	17	2	2	15	22,4
30	30	72	19	2	2	20,4	30
35 RU 03	35	80	21	2,5	2	25	36
40	40	90	23	2,5	2,5	32,5	45,5
45	45	100	25	2,5	2,5	40	58,5
50 RU 03	50	110	27	3	3	51	71
55	55	120	29	3	3	58,5	85
60	60	130	31	3,5	3,5	72	102
65 RU 03	65	140	33	3,5	3,5	81,5	114
70	70	150	35	3,5	3,5	90	125
75	75	160	37	3,5	3,5	108	158
80 RU 03	80	170	39	3,5	3,5	118	160
85	85	180	41	4	4	129	180
90	90	190	43	4	4	153	208
95 RU 03	95	200	45	4	4	166	224
100	100	215	47	4	4	193	260
110	110	240	50	4	4	220	300
120	120	260	55	4	4	270	355

Nizovi RN 02, RJ 02 i RT 02 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 02.

Nizovi RN 03, RJ 03 i RT 03 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 03.

Oznaka	Dimenzije (mm)					Nosivost (kN)	
	d	*D*	*b*	*r*	r_1	C_o	*C*
Niz RU 04							
30 RU 04	30	90	23	2,5	2,5	32	51
35	35	100	25	2,5	2,5	41,5	63
40	40	110	27	3	3	53	80
45 RU 04	45	120	29	3	3	60	90
50	50	130	31	3,5	3,5	73,5	112
55	55	140	33	3,5	3,5	81,5	118
60 RU 04	60	150	35	3,5	3,5	98	143
65	65	160	37	3,5	3,5	108	156
70	70	180	42	4	4	137	200
75 RU 04	75	190	45	4	4	160	232
80	80	200	48	4	4	183	265
85	85	210	52	5	5	208	305
90 RU 04	90	225	54	5	5	232	345
95	95	240	55	5	5	255	365
100	100	250	58	5	5	285	405
110 RU 04	110	280	65	5	5	320	455
120	120	310	72	6	6	355	500
Niz RU 22							
25 RU 22	25	52	18	1,5	1	13,2	16,6
30	30	62	20	1,5	1	19	23,2
35	35	72	23	2	1	28,5	35,5
40 RU 22	40	80	23	2	2	34,5	41,5
45	45	85	23	2	2	37,5	44
50	50	90	23	2	2	40,5	45,5
55 RU 22	55	100	25	2,5	2	47,5	54
60	60	110	28	2,5	2,5	62	71
65	65	120	31	2,5	2,5	75	85
70 RU 22	70	125	31	2,5	2,5	80	90
75	75	130	31	2,5	2,5	86,5	96,5
80	80	140	33	3	3	102	114
85 RU 22	85	150	36	3	3	118	132
90	90	160	40	3	3	134	153
95	95	170	43	3,5	3,5	163	183
100 RU 22	100	180	46	3,5	3,5	186	204
110	110	200	53	3,5	3,5	224	255
120	120	215	58	3,5	3,5	265	300

Nizovi RN 04, RJ 04 i RT 04 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 04.

Nizovi RJ 22 i RT 22 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 22.

Jednoredni valjkasti ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	r	r_1	Nosivost (kN) C_0	C
Niz RU 23							
25 RU 23	25	62	24	2	2	23,2	31,5
30	30	72	27	2	2	28,5	37,5
35	35	80	31	2,5	2	34	44
40 RU 23	40	90	33	2,5	2,5	49	61
45	45	100	36	2,5	2,5	57	75
50	50	110	40	3	3	73,5	93
55 RU 23	55	120	43	3	3	83	108
60	60	130	46	3,5	3,5	106	132
65	65	140	48	3,5	3,5	110	143
70 RU 23	70	150	51	3,5	3,5	134	170
75	75	160	55	3,5	3,5	166	212
80	80	170	58	3,5	3,5	183	224
85 RU 23	85	180	60	4	4	196	245
90	90	190	64	4	4	220	270
95	95	200	67	4	4	255	310
100 RU 23	100	215	73	4	4	300	365
110	110	240	80	4	4	405	500
120	120	260	86	4	4	510	620
Niz RU 49							
10 RU 49	10	22	13	0,5		4,3	5,3
12	12	24	13	0,5		5,1	5,85
15	15	28	13	0,5		6,55	7,5
17 RU 49	17	30	13	0,5		6,55	7,5
20	20	37	17	0,5		12	13,7
22	22	39	17	0,5		12	13,7
25 RU 49	25	42	17	0,5		13,7	15
28	28	45	17	0,5		15,6	16,3
30	30	47	17	0,5		15,6	16,3
32 RU 49	32	52	20	1		22	24
35	35	55	20	1		24,5	26
40	40	62	22	1		31	32,5
45 RU 49	45	68	22	1		34,5	35,5
50	50	72	22	1		38	37,5
55	55	80	25	1,5		47,5	45,5
60 RU 49	60	85	25	1,5		52	49
65	65	90	25	1,5		56	51
70	70	100	30	1,5		78	73,5
75 RU 49	75	105	30	1,5		85	78
80	80	110	30	1,5		85	78
85	85	120	35	2		108	98
90 RU 49	90	125	35	2		116	104
95	95	130	35	2		116	104

Nizovi RJ 23 i RT 23 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 23.

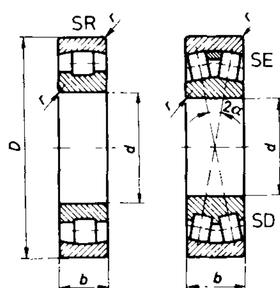
Dvoredni valjkasti ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	r	Nosivost (kN) C_0	C
Niz RA 49						
100 RA 49	100	140	40	2	104	98
105	105	145	40	2	108	100
110	110	150	40	2	110	102
120 RA 49	120	165	45	2	137	125
130	130	180	50	2,5	166	153
140	140	190	50	2,5	176	160
150 RA 49	150	210	60	3	224	208
160	160	220	60	3	236	216
170	170	230	60	3	245	220
180 RA 49	180	250	69	3	305	285
190	190	260	69	3	325	290
200	200	280	80	3,5	390	365
220 RA 49	220	300	80	3,5	415	380
240	240	320	80	3,5	455	400
260	260	360	100	3,5	640	600
280 RA 49	280	380	100	3,5	680	620
300	300	420	118	4	900	830
320	320	440	118	4	915	850
Niz RD 30 *K**						
30 RD 30 K	30	55	19	1,5	21,2	25
35	35	62	20	1,5	26,5	31
40	40	68	21	1,5	34,5	39
45 RD 30 K	45	75	23	1,5	42,5	46,5
50	50	80	23	1,5	46,5	49
55	55	90	26	2	57	62
60 RD 30 K	60	95	26	2	63	65,5
65	65	100	26	2	67	67
70	70	110	30	2	83	85
75 RD 30 K	75	115	30	2	86,5	88
80	80	125	34	2	102	106
85	85	130	34	2	110	110
90 RD 30 K	90	140	37	2,5	129	132
95	95	145	37	2,5	134	134
100	100	150	37	2,5	140	137
110 RD 30 K	110	170	45	3	200	208
120	120	180	46	3	216	216
130	130	200	52	3	275	275
140 RD 30 K	140	210	53	3	285	285
150	150	225	56	3,5	335	325
160	160	240	60	3,5	375	365

* Niz RD 30 K ima koničnu rupu s konusom 1 : 12. Vrijednosti za nutarnji promjer d odnose se na užu stranu rupe.

Bačvasti ležaji

Nizovi SR, SE in SD
(JUS M.C3.651/655/657 — 1966)



Niz SR: jednoredni samopodesivi ležaji s radijalnim dodirom i vodećim nutarnjim prstenom (α = 0, vidi str. 597)

Niz SE: dvoredni samopodesivi ležaji s kosim dodirom i prstenastim uloškom

Niz SD: dvoredni samopodesivi ležaji s radijalnim dodirom i vodećim nutarnjim prstenom

Jednoredni bačvasti ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm) *d*	*D*	*b*	*r*	Nosivost (kN) C_0	*C*
Niz SR 02						
25 SR 02	25	52	15	1,5	14,3	15
30	30	62	16	1,5	16,3	17,3
35	35	72	17	2	24,5	25
40 SR 02	40	80	18	2	30	30
45	45	85	19	2	32	32
50	50	90	20	2	38	37,5
55 SR 02	55	100	21	2,5	48	47,5
60	60	110	22	2,5	56	55
65	65	120	23	2,5	64	62
70 SR 02	70	125	24	2,5	73,5	71
75	75	130	25	2,5	78	75
80	80	140	26	3	90	85
85 SR 02	85	150	28	3	112	100
90	90	160	30	3	122	120
95	95	170	32	3,5	146	140
100 SR 02	100	180	34	3,5	160	156
110	110	200	38	3,5	208	196
120	120	215	40	3,5	228	216
130 SR 02	130	230	40	4	245	232
140	140	250	42	4	290	275
150	150	270	45	4	335	310

Oznaka	Dimenzije (mm) *d*	*D*	*b*	*r*	Nosivost (kN) C_0	*C*
Niz SR 03						
20 SR 03	20	52	15	2	14,6	16
25	25	62	17	2	20	21,6
30	30	72	19	2	28	30
35 SR 03	35	80	21	2,5	34,5	36,5
40	40	90	23	2,5	46,5	50
45	45	100	25	2,5	53	56
50 SR 03	50	110	27	3	68	71
55	55	120	29	3	78	81,5
60	60	130	31	3,5	96,5	100
65 SR 03	65	140	33	3,5	112	116
70	70	150	35	3,5	122	129
75	75	160	37	3,5	146	146
80 SR 03	80	170	39	3,5	163	166
85	85	180	41	4	183	186
90	90	190	43	4	204	212
95 SR 03	95	200	45	4	224	232
100	100	215	47	4	245	250
110	110	240	50	4	290	300
120 SR 03	120	260	55	4	345	355
130	130	280	58	5	400	400
140	140	300	62	5	475	475
150	150	320	65	5	530	540
Niz SR 04						
25 SR 04	25	80	21	2,5	34,5	36,5
30	30	90	23	2,5	46,5	48
35	35	100	25	2,5	53	58,5
40 SR 04	40	110	27	3	68	73,5
45	45	120	29	3	78	85
50	50	130	31	3,5	96,5	106
55 SR 04	55	140	33	3,5	112	120
60	60	150	35	3,5	122	129
65	65	160	37	3,5	146	150
70 SR 04	70	180	42	4	183	190
75	75	190	45	4	204	212
80	80	200	48	4	224	250
85 SR 04	85	210	52	5	255	280
90	90	230	54	5	270	310
95	95	240	55	5	290	335
100 SR 04	100	250	58	5	340	375
110	110	280	65	5	380	430

Dvoredni bačvasti ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm) *d*	*D*	*b*	*r*	Nosivost (kN) C_0	*C*
Niz SE 13						
20 SE 13	20	52	15	2	19	28,4
25	25	62	17	2	27	30,5
30	30	72	19	2	38	43
35 SE 13	35	80	21	2,5	45	49
40	40	90	23	2,5	60	63
45	45	100	25	2,5	78	76,5
50 SE 13	50	110	27	3	83	88
55	55	120	29	3	98	104
60	60	130	31	3,5	114	118
65 SE 13	65	140	33	3,5	137	140
70	70	150	35	3,5	156	160
75	75	160	37	3,5	176	180
80 SE 13	80	170	39	3,5	196	196
85	85	180	41	4	220	220
90	90	190	43	4	245	240
95 SE 13	95	200	45	4	265	260
100	100	215	47	4	310	300
105	105	225	49	4	340	325
110	110	240	50	4	375	360

Prema JUS M.C3.655 — 1966 standardizirani su još i dvoredni bačvasti ležaji (samopodesivi):

niz SD 22: d = 25 ...200 mm
D = 52 ...360 mm
b = 18 ... 98 mm

niz SD 23: d = 40 ...200 mm
D = 90 ...420 mm
b = 33 ...138 mm

niz SD 30: d = 110 ...400 mm
D = 170 ...600 mm
b = 45 ...148 mm

niz SD 31: d = 110 ...360 mm
D = 180 ...600 mm
b = 56 ...192 mm

niz SD 32: d = 90 ...500 mm
D = 160 ...920 mm
b = 52,4...336 mm

niz SD 40: d = 120 ...360 mm
D = 180 ...540 mm
b = 60 ...180 mm

niz SD 41: d = 110 ...300 mm
D = 180 ...500 mm
b = 69 ...200 mm

Standardi JUS za te ležaje ne propisuju nosivost C_0 i C.

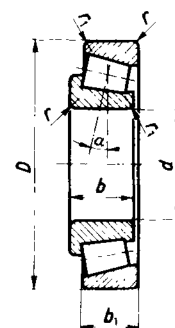
Stožasti ležaji

Niz KB

(JUS M.C3.735 — 1966)

Niz KB:

Stožasti ležaji podnose velika sastavljena (radijalna i aksijalna) opterećenja. Vanjski i nutarnji prsten mogu se montirati posebice.



Oznaka	Dimenzije (mm) *d*	*D*	*b*	b_1	*r*	r_1	Nosivost (kN) C_0	*C*
Niz KB 02								
20 KB 02	20	47	14	12	1,5	0,5	12,9	18,3
25	25	52	15	13	1,5	0,5	15,6	19
30	30	62	16	14	1,5	0,5	20,8	26
35 KB 02	35	72	17	15	2	0,8	26,5	32,5
40	40	80	18	16	2	0,8	31	38
45	45	85	19	16	2	0,8	36	42,5
50 KB 02	50	90	20	17	2	0,8	40,5	46,5
55	55	100	21	18	2,5	0,8	52	56
60	60	110	22	19	2,5	0,8	56	62
65 KB 02	65	120	23	20	2,5	0,8	65,5	73,5
70	70	125	24	21	2,5	0,8	71	78
75	75	130	25	22	2,5	0,8	81,5	85
80 KB 02	80	140	26	22	3	1	88	96,5
85	85	150	28	24	3	1	106	114
90	90	160	30	26	3	1	120	127
95 KB 02	95	170	32	27	3,5	1,2	132	137
100	100	180	34	29	3,5	1,2	156	160
105	105	190	36	30	3,5	1,2	170	176
110 KB 02	110	200	38	32	3,5	1,2	196	196
120	120	215	40	34	3,5	1,2	216	220
130	130	230	40	34	4	1,5	232	240
140 KB 02	140	250	42	36	4	1,5	280	280
150	150	270	45	38	4	1,5	325	310

Stožasti ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	b	b_1	r	r_1	Nosivost (kN) C_0	C
Niz KB 03								
20 **KB** 03	20	52	15	13	2	0,8	16	22,4
25	25	62	17	15	2	0,8	21,6	30
30	30	72	19	16	2	0,8	28,5	37,5
35 **KB** 03	35	80	21	18	2,5	0,8	37,5	48
40	40	90	23	20	2,5	0,8	45	56
45	45	100	25	22	2,5	0,8	57	68
50 **KB** 03	50	110	27	23	3	1	67	78
55	55	120	29	25	3	1	78	90
60	60	130	31	26	3,5	1,2	91,5	108
65 **KB** 03	65	140	33	28	3,5	1,2	108	125
70	70	150	35	30	3,5	1,2	122	140
75	75	160	37	31	3,5	1,2	137	156
80 **KB** 03	80	170	39	33	3,5	1,2	153	173
85	85	180	41	34	4	1,5	170	193
90	90	190	43	36	4	1,5	190	212
95 **KB** 03	95	200	45	38	4	1,5	228	250
100	100	215	47	39	4	1,5	255	275
105	105	225	49	41	4	1,5	270	290

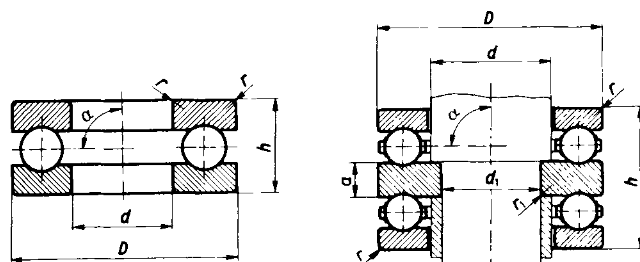
Oznaka	Širina (mm) b	b_1	Nosivost (kN) C_0	C	Oznaka	Širina (mm) b	b_1	Nosivost (kN) C_0	C
Niz KB 22*					*Niz KB* 23**				
30 **KB** 22	20	17	27,5	32	20 **KB** 23	21	18	22,8	29
35	23	19	36,5	43	25	24	20	32	40
40	23	19	40,5	47,5	30	27	23	43	52
45 **KB** 22	23	19	46,5	52	35 **KB** 23	31	23	54	64
50	23	19	48	53	40	33	27	67	75
55	25	21	63	67	45	36	30	81,5	90
60 **KB** 22	28	24	76,5	80	50 **KB** 23	40	33	102	110
65	31	27	93	98	55	43	35	120	127
70	31	27	93	98	60	46	37	140	146
75 **KB** 22	31	27	102	104	65 **KB** 23	48	39	160	170
80	33	28	116	120	70	51	42	183	190
85	36	30	137	137	75	55	45	212	216
90 **KB** 22	40	34	166	163	80 **KB** 23	58	48	236	240
95	43	37	186	186	85	60	49	275	275
100	46	39	212	208	90	64	53	315	315
105 **KB** 22	50	43	245	240	95 **KB** 23	67	55	345	345
110	53	46	275	260	100	73	60	405	390
120	58	50	340	305	105	77	63	450	430

* Promjeri d i D te polumjeri r i r_1 isti su kao kod odgovarajućih veličina niza **KB** 02.

** Promjeri d i D te polumjeri r i r_1 isti su kao kod odgovarajućih veličina niza **KB** 03.

Aksijalni kuglični ležaji

Nizovi TA i TDC (JUS M.C3.701/705 — 1966)



TA

Niz TA: jednoredni aksijalni kuglični ležaji (podnose aksijalna opterećenja u jednom smjeru).

TDC

Niz TDC: dvoredni aksijalni kuglični ležaji (podnose aksijalna opterećenja u oba smjera).

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	h	r	Nosivost (kN) C_0	C
Niz TA 11						
10 **TA** 11	10	24	9	0,5	11,4	5,7
12	12	26	9	0,5	12,5	6,1
15	15	28	9	0,5	13,7	6,5
17 **TA** 11	17	30	9	0,5	16	7,2
20	20	35	10	0,5	22	9,65
25	25	42	11	1	29	12,2
30 **TA** 11	30	47	11	1	32,5	13,2
35	35	52	12	1	39	14,6
40	40	60	13	1	52	19,6
45 **TA** 11	45	65	14	1	57	20,8
50	50	70	14	1	62	22,4
55	55	78	16	1	76,5	27
60 **TA** 11	60	85	17	1,5	93	32
65	65	90	18	1,5	96,5	33,5
70	70	95	18	1,5	104	34,5
75 **TA** 11	75	100	19	1,5	112	36,5
80	80	105	19	1,5	116	37,5
85	85	110	19	1,5	125	39
90 **TA** 11	90	120	22	1,5	156	50
100	100	135	25	1,5	220	69,5
110	110	145	25	1,5	236	73,5

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	h	r	Nosivost (kN) C_0	C
Niz TA 12						
10 TA 12	10	26	11	1	14	7,2
12	12	28	11	1	15,6	7,8
15	15	32	12	1	20,4	9,5
17 TA 12	17	35	12	1	22	10
20	20	40	14	1	31	14
25	25	47	15	1	41,5	18
30 TA 12	30	52	16	1	48	19,6
35	35	62	18	1,5	64	26,5
40	40	68	19	1,5	76,5	30,5
45 TA 12	45	73	20	1,5	86,5	32,5
50	50	78	22	1,5	91,5	34,5
55	55	90	25	1,5	132	49
60 TA 12	60	95	26	1,5	146	53
65	65	100	27	1,5	156	55
70	70	105	27	1,5	163	57
75 TA 12	75	110	27	1,5	173	58,5
80	80	115	28	1,5	180	61
85	85	125	31	1,5	220	72
90 TA 12	90	135	35	2	270	86,5
100	100	150	38	2	340	108
110	110	160	38	2	375	114
Niz TA 13						
25 TA 13	25	52	18	1,5	51	22,8
30	30	60	21	1,5	65,5	28
35	35	68	24	1,5	86,5	36
40 TA 13	40	78	26	1,5	112	45
45	45	85	28	1,5	134	53
50	50	95	31	2	166	63
55 TA 13	55	105	35	2	204	76,5
60	60	110	35	2	220	81,5
65	65	115	36	2	236	85
70 TA 13	70	125	40	2	280	98
75	75	135	44	2,5	325	112
80	80	140	44	2,5	355	116
85 TA 13	85	150	49	2,5	405	132
90	90	155	50	2,5	405	132
100	100	170	55	2,5	490	156
110 TA 13	110	190	63	3	585	180
120	120	210	70	3,5	720	216
130	130	225	75	3,5	780	232
140 TA 13	140	240	80	3,5	930	260
150	150	250	80	3,5	1 000	270
160	160	270	87	4	1 200	320

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d	D	h	r	Nosivost (kN) C_0	C
Niz TA 14						
25 TA 14	25	60	24	1,5	73,5	33,5
30	30	70	28	1,5	104	44
35	35	80	32	2	127	53
40 TA 14	40	90	36	2	170	68
45	45	100	39	2	200	78
50	50	110	43	2,5	250	95
55 TA 14	55	120	48	2,5	300	108
60	60	130	51	2,5	360	127
65	65	140	56	3	405	140
70 TA 14	70	150	60	3	455	153
75	75	160	65	3	510	170
80	80	170	68	3,5	560	183
85 TA 14	85	180	72	3,5	620	196
90	90	190	77	3,5	680	212
100	100	210	85	4	880	260
110 TA 14	110	230	95	4	1 020	290
120	120	250	102	5	1 100	310
130	130	270	110	5	1 460	380
140 TA 14	140	280	112	5	1 460	380
150	150	300	120	5	1 630	415
160	160	320	130	6	2 000	480

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm) d		D		h	r		Nosivost (kN) C_0	C
Niz TDC 22									
15 TDC 22	15	10	32	22	5	1	0,5	20,4	9,5
20	20	15	40	26	6	1	0,5	31	14
25	25	20	47	28	7	1	0,5	41,5	18
30 TDC 22	30	25	52	29	7	1	0,5	48	19,6
35	35	30	62	34	8	1,5	0,5	64	26,5
40	40	30	66	36	9	1,5	1	76,5	30,5
45 TDC 22	45	35	73	37	9	1,5	1	86,5	32,5
50	50	40	78	39	9	1,5	1	91,5	34,5
55	55	45	90	45	10	1,5	1	132	49
60 TDC 22	60	50	95	46	10	1,5	1	146	53
65	65	55	100	47	10	1,5	1	156	55
70	70	55	105	47	10	1,5	1,5	163	57
75 TDC 22	75	60	110	47	10	1,5	1,5	173	58,5
80	80	65	115	48	10	1,5	1,5	180	61
85	85	70	125	55	12	1,5	1,5	220	72

Dvoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)							Nosivost (kN)	
	d	d_1	D	h	a	r	r_1	C_0	C
Niz TDC 22									
90 TDC 22	90	75	135	62	14	2	1,5	270	86,5
100	100	85	150	67	15	2	1,5	340	108
110	110	95	160	67	15	2	1,5	375	114
120 TDC 22	120	100	170	68	15	2	2	390	118
130	130	110	190	80	18	2,5	2	510	150
140	140	120	200	81	18	2,5	2	540	156
Niz TDC 23									
25 TDC 23	25	20	52	34	8	1,5	0,5	51	22,8
30	30	25	60	38	9	1,5	0,5	65,5	28
35	35	30	68	44	10	1,5	0,5	86,5	36
40 TDC 23	40	30	78	49	12	1,5	1	112	45
45	45	35	85	52	12	1,5	1	134	53
50	50	40	95	58	14	2	1	166	63
55 TDC 23	55	45	105	64	15	2	1	204	76,5
60	60	50	110	64	15	2	1	220	81,5
65	65	55	115	65	15	2	1	236	85
70 TDC 23	70	55	125	72	16	2	1,5	280	98
75	75	60	135	79	18	2,5	1,5	325	112
80	80	65	140	79	18	2,5	1,5	355	116
85 TDC 23	85	70	150	87	19	2,5	1,5	405	132
90	90	75	155	88	19	2,5	1,5	405	132
100	100	85	170	97	21	2,5	1,5	490	156
110 TDC 23	110	95	190	110	24	3	1,5	585	180
120	120	100	210	123	27	3,5	2	720	216
130	130	110	225	130	30	3,5	2	780	232
140 TDC 23	140	120	240	140	31	3,5	2	930	260
150	150	130	250	140	31	3,5	2	1000	275
160	160	140	270	153	33	4	2	1 200	320
Niz TDC 24									
25 TDC 24	25	15	60	45	11	1,5	1	73,5	33,5
30	30	20	70	52	12	1,5	1	104	44
35	35	25	80	59	14	2	1	127	53
40 TDC 24	40	30	90	65	15	2	1	170	68
45	45	35	100	72	17	2	1	200	78
50	50	40	110	78	18	2,5	1	255	95
55 TDC 24	55	45	120	87	20	2,5	1	300	108
60	60	50	130	93	21	2,5	1	360	127
65	65	50	140	101	23	3	1,5	405	140
70 TDC 24	70	55	150	107	24	3	1,5	455	153
75	75	60	160	115	26	3	1,5	510	170
80	80	65	170	120	27	3,5	1,5	560	183
85 TDC 24	85	65	180	128	29	3,5	2	620	196
90	90	70	190	135	30	3,5	2	680	212
100	100	80	210	150	33	4	2	880	260

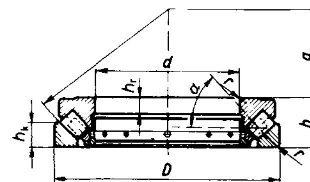
Aksijalni bačvasti ležaji

Nizovi TS i TSA

(JUS M.C3.711/715 — 1966)

Niz TS: samopodesivi aksijalni ležaji s nesimetričnim bačvastim valjčićima.

Niz TSA: samopodesivi aksijalni ležaji sa simetričnim bačvastim valjčićima.



Oznaka	Dimenzije (mm)							Nosivost (kN)	
	d	D	h	h_r	h_k	a	r	C_0	C
Niz TS 92									
200 TS 92	200	280	48	15	24	108	3	1 140	425
220	220	300	48	15	24	117	3	1 250	430
240	240	340	60	19	30	130	3,5	1 800	630
260 TS 92	260	360	60	19	30	139	3,5	1 860	640
280	280	380	60	19	30	150	3,5	2 000	680
300	300	420	73	21	38	162	4	2 450	850
320 **TS** 92	320	440	73	21	38	172	4	2 600	880
340	340	460	73	21	38	183	4	2 700	915
360	360	500	85	25	38	194	5	3 250	1 160
380 TS 92	380	520	85	27	42	202	5	3 800	1 270
400	400	540	85	27	42	212	5	4 050	1 320
420	420	580	95	30	46	225	6	4 900	1 600
440 TS 92	440	600	95	30	46	235	6	5 000	1 660
460	460	620	95	30	46	245	6	5 200	1 660
480	480	650	103	33	55	259	6	5 700	1 900
500	500	670	103	33	55	268	6	6 000	1 930
Niz TS 93									
100 TS 93	100	170	42	14	20,8	58	2,5	585	280
110	110	190	48	16	23	64	3	750	345
120	120	210	54	18	26	70	3,5	950	430
130 TS 93	130	225	58.	19	28	76	3,5	1 080	490
140	140	240	60	20	29	82	3,5	1 250	550
150	150	250	60	20	29	87	3,5	1 290	570
160 TS 93	160	270	67	23	32	92	4	1 500	655
170	170	280	67	23	32	96	4	1 560	670
180	180	300	73	25	35	103	4	1 860	800
190	190	320	78	27	38	110	5	2 160	930
200 TS 93	200	340	85	29	41	116	5	2 550	1 060
220	220	360	85	29	41	125	5	2 650	1 080
240	240	380	85	29	41	135	5	2 800	1 120
260	260	420	95	32	45	148	6	3 600	1 460

Aksijalni bačvasti ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)							Nosivost (kN)	
	d	D	h	h_r	h_k	a	r	C_0	C
Niz TS 93									
280 TS 93	280	440	95	32	46	158	6	3 750	1 500
300	300	480	109	37	50	168	6	4 500	1 800
320	320	500	109	37	53	180	6	4 750	1 830
340 TS 93	340	540	122	41	59	192	6	5 600	2 200
360	360	560	122	41	59	202	6	5 850	2 240
380	380	600	132	44	63	216	8	7 100	2 700
400 TS 93	400	620	132	44	64	225	8	7 350	2 800
420	420	650	140	48	68	235	8	7 650	2 900
440	440	680	145	49	70	245	8	8 500	3 250
460 TS 93	460	710	150	51	72	257	8	9 500	3 550
480	480	730	150	51	72	270	8	9 650	3 600
500	500	750	150	51	74	280	8	10 200	3 650
Niz TS 94									
60 TS 94	60	130	42	15	20	38	2,5	404	232
65	65	140	45	16	21	42	3	520	275
70	70	150	48	17	23	44	3	570	300
75 TS 94	75	160	51	18	24	47	3	670	345
80	80	170	54	19	26	50	3,5	720	375
85	85	180	58	21	28	54	3,5	830	425
90 TS 94	90	190	60	22	29	56	3,5	965	490
100	100	210	67	24	32	62	4	1 160	585
110	110	230	73	26	35	69	4	1 370	680
120 TS 94	120	250	78	29	37	74	5	1 600	780
130	130	270	85	31	41	81	5	1 860	915
140	140	280	85	31	41	86	5	2 000	950
150 TS 94	150	300	90	32	44	92	5	2 280	1 080
160	160	320	95	34	45	99	6	2 600	1 220
170	170	340	103	37	50	104	6	2 900	1 370
180 TS 94	180	360	109	39	52	110	6	3 250	1 530
190	190	380	115	41	55	117	6	3 600	1 660
200	200	400	122	43	59	122	6	4 050	1 860
220	220	420	122	43	59	132	8	4 250	1 900
240 TS 94	240	440	122	43	59	142	8	4 500	1 960
260	260	480	132	48	64	154	8	5 500	2 360
280	280	520	145	52	68	166	8	6 400	2 800
300	300	540	145	52	70	175	8	6 400	2 800

Standardizirani su (JUS M.C3.715 — 1966) još i slijedeći nizovi aksijalnih bačvastih ležaja:

niz TSA 92: $d = 240 \ldots 500$ mm, $D = 340 \ldots 670$ mm,
niz TSA 93: $d = 120 \ldots 500$ mm, $D = 210 \ldots 750$ mm,
niz TSA 94: $d = 60 \ldots 300$ mm, $D = 130 \ldots 540$ mm.

Standardi JUS za te nizove ležaja ne propisuju nosivosti C_0 i C.

Nosivost valjnih ležaja (prema ISO)

Statička nosivost ležaja (JUS M.C3.851 – 1963).

Statička nosivost je nosivost u mirovanju, tj. ono radijalno odn. aksijalno (centrično) opterećenje radijalnih odnosno aksijalnih ležaja pri kojem nastaje ukupna plastična deformacija od 10^{-4} promjera valjnog tijela.

Proračun statičke nosivosti (JUS M.C3.853 . . . 856 – 1965).

Statička nosivost C_0 za pojedine vrste ležaja dana je u tablicama (str. 577 do 596)

Ekvivalentno statičko opterećenje F_0 ovisno je o radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a.

a) *Ekvivalentno statičko opterećenje za radijalne ležaje*

— pri čistom radijalnom opterećenju ($F_a = 0$)

$$F_0 = F_r$$

— uz istodobno radijalno i aksijalno opterećenje — uzimamo veću od slijedećih dviju vrijednosti

$$F_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \qquad F_0 = F_r$$

Vrijednosti za X_0 i Y_0 iznose:

Vrsta radijalnog ležaja	Jednoredni ležaji		Dvoredni ležaji	
	X_0	Y_0	X_0	Y_0
Kuglični ležaji s radijalnim dodirom	0,6	0,5	0,6	0,5
Kuglični ležaji s kosim dodirom				
$\alpha = 20°$	0,5	0,42	1	0,84
$\alpha = 25°$	0,5	0,38	1	0,76
$\alpha = 30°$	0,5	0,33	1	0,66
$\alpha = 35°$	0,5	0,29	1	0,58
$\alpha = 40°$	0,5	0,26	1	0,52
Samopodesivi kuglični ležaji	0,5	$0{,}22 \cot\alpha$	1	$0{,}44 \cot\alpha$
Valjkasti ležaji	0,5	$0{,}22 \cot\alpha$	1	$0{,}44 \cot\alpha$

b) *Ekvivalentno statičko opterećenje za aksijalne ležaje*

— istodobno aksijalno i radijalno opterećenje*

$$F_0 = F_a + 2{,}3\, F_r \tan\alpha$$

(Za jednoredne aksijalne ležaje ta jednadžba više ne vrijedi točno ako je $F_r > 0{,}44\, F_a \cot\alpha$.)

*

Statička nosivost C_0 ne smije biti manja od ekvivalentnog statičkog opterećenja F_0

$$C_0 \geqq F_0$$

* α je kut dodira (kut između dodirne osi i okomice na os ležajnog provrta).

Dinamička nosivost ležaja (JUS M.C3.852 — 1963)

Trajnost valjnog ležaja određena je brojem okretaja (ili satima rada uz konstantnu brzinu vrtnje) pri kojem se pojavljuju prvi znakovi umora materijala.

Nazivno trajanje skupine jednakih ležaja je onaj broj okretaja (ili sati rada uz konstantnu brzinu vrtnje) što ga dostigne ili premaši 90% ležaja iz te skupine prije pojave prvih znakova umora materijala.

Dinamička nosivost radijalnog odn. aksijalnog ležaja je čisto radijalno odn. aksijalno konstantno opterećenje kojim možemo opteretiti skupinu jednakih ležaja s nazivnim trajanjem od 10^6 okretaja.

Proračun dinamičke nosivosti (JUS M.C3.857/858/859/860 — 1964).

Dinamička nosivost C za pojedine vrste ležaja dana je u tablicama (str. 577 do 596).

a) *Ekvivalentno dinamičko opterećenje* F pri radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a – *za aksijalne ležaje*

$$F = V \cdot XF_r + YF_a$$

pri čemu faktor V iznosi:

Vrsta radijalnog ležaja	Unutarnji prsten se okreće	Unutarnji prsten miruje
kuglični ležaji		
— s radijalnim dodirom	1	1,2
— s kosim dodirom	1	1,2
— samopodesivi	1	1
— jednoredni s radijalnim dodirom, rastavljivi	1	1
valjkasti ležaji	1	1,2

Vrijednosti X i Y za radijalne kuglične ležaje s radijalnim dodirom

$\frac{F_a}{C_o}$	e	Jednoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ X	Jednoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ Y	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r \leq e$ X	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r \leq e$ Y	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ X	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ Y
0,014	0,19		2,30				2,30
0,028	0,22		1,99				1,99
0,056	0,26		1,71				1,71
0,084	0,28		1,55				1,55
0,11	0,30	0,56	1,45	1	0	0,56	1,45
0,17	0,34		1,31				1,31
0,28	0,38		1,15				1,15
0,42	0,42		1,04				1,04
0,56	0,44		1,00				1,00

Za rastavljive jednoredne radijalne kuglične ležaje s radijalnim dodirom vrijedi

$$F_a/VF_r > 0{,}2 \begin{cases} X = 0{,}50 \\ Y = 2{,}5 \end{cases}$$

Vrijednosti X i Y za radijalne kuglične ležaje s kosim dodirom

α	$i\frac{F_a}{C_o}$*	e	Jednoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ X	Jednoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ Y	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r \leq e$ X	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r \leq e$ Y	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ X	Dvoredni ležaji $F_a/VF_r > e$ Y
	0,014	0,23	Za e, X i Y vrijednosti su iste kao kod kugličnih ležaja s radijalnim dodirom (str. 598)			2,78		3,74
	0,028	0,26				2,40		3,23
	0,056	0,30				2,07		2,78
	0,085	0,34				1,87		2,52
5°	0,11	0,36			1	1,75	0,78	2,36
	0,17	0,40				1,58		2,13
	0,28	0,45				1,39		1,87
	0,42	0,50				1,26		1,69
	0,56	0,52				1,21		1,63
	0,014	0,29		1,88		2,18		3,06
	0,029	0,32		1,71		1,98		2,78
	0,057	0,36		1,52		1,76		2,47
	0,086	0,38		1,41		1,63		2,29
10°	0,11	0,40	0,46	1,34	1	1,55	0,75	2,18
	0,17	0,44		1,23		1,42		2,00
	0,29	0,49		1,10		1,27		1,79
	0,43	0,54		1,01		1,17		1,64
	0,57	0,54		1,00		1,16		1,63
	0,015	0,38		1,47		1,65		2,39
	0,029	0,40		1,40		1,57		2,28
	0,058	0,43		1,30		1,46		2,11
	0,087	0,46		1,23		1,38		2,00
15°	0,12	0,47	0,44	1,19	1	1,34	0,72	1,93
	0,17	0,50		1,12		1,26		1,82
	0,29	0,55		1,02		1,14		1,66
	0,44	0,56		1,00		1,12		1,63
	0,58	0,56		1,00		1,12		1,63
20°		0,57	0,43	1,00		1,09	0,70	1,63
25°		0,68	0,41	0,87		0,92	0,67	1,41
30°	—	0,80	0,39	0,76	1	0,78	0,63	1,24
35°		0,95	0,37	0,66		0,66	0,60	1,07
40°		1,14	0,35	0,57		0,55	0,57	0,93

* i — broj redova kuglica u jednom ležaju.

Vrijednosti X i Y za samopodesive radijalne ležaje

Vrsta radijalnog ležaja	$F_a/VF_r \leqq 1{,}5 \tan\alpha$		$F_a/VF_r > 1{,}5 \tan\alpha$	
	X	Y	X	Y
Samopodesivi kuglični ležaji				
— jednoredni	—	—	0,40	0,4 $\cot\alpha$
— dvoredni	1	0,42 $\cot\alpha$	0,65	0,65 $\cot\alpha$
Samopodesivi valjkasti ležaji				
— jednoredni	1	0	0,4	0,4 $\cot\alpha$
— dvoredni	1	0,45 $\cot\alpha$	0,67	0,67 $\cot\alpha$

Za $\alpha = 0$: $F_a = 0$, $X = 1$

b) *Ekvivalentno dinamičko opterećenje F* pri radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a – *za aksijalne ležaje*

$$F = XF_r + YF_a$$

Vrijednosti X i Y

Vrsta aksijalnog ležaja	e	Jednosmj. ležaji $F_a/F_r > e$		Dvosmjerni ležaji $F_a/F_r \leqq e$		$F_a/F_r > e$	
		X	Y	X	Y	X	Y
Kuglični ležaji s kosim dodirom							
$\alpha = 45°$	1,25	0,66	1	1,18	0,59	0,66	1
$\alpha = 60°$	2,17	0,92	1	1,90	0,54	0,92	1
$\alpha = 75°$	4,67	1,66	1	3,89	0,52	1,66	1
Samopodesivi valjkasti ležaji	1,5 $\tan\alpha$	$\tan\alpha$	1	1,5 $\tan\alpha$	0,67	$\tan\alpha$	1

Za $\alpha = 90°$: $F_r = 0$, $Y = 1$

*

Trajnost ležaja L ovisi o dinamičkoj nosivosti C i ekvivalentnom opterećenju F te iznosi

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^m \qquad (10^6 \text{ okretaja})$$

pri čemu je eksponent m:
za kuglične ležaje $m = 3$
za valjkaste ležaje $m = 10/3$

MAZIVA

S obzirom na izvor maziva razlikujemo slijedeće vrste:

Mineralna ulja se najčešće upotrebljavaju kao maziva u tehnici. Dobivamo ih destilacijom iz sirovog zemnog ulja (nafte). Većinu destilata treba još i rafinirati. Rafinati su skuplji, no ujedno i trajniji te imaju dobru mazivost ako nisu previše rafinirani.

Biljna i životinjska ulja (koštano, ricinusovo, repičino ulje) veoma su masna pa bolje mažu od mineralnih, ali se pri upotrebi pretvaraju djelomice u smolu i razgrađuju. Stoga se vrlo rijetko upotrebljavaju posve sama.

Zamašćena (kompaundirana) ulja mješavina su mineralnih i biljnih ili životinjskih ulja. Zato je njihova mazivost osobito dobra, ali brže stare nego čista mineralna ulja.

Mineralna ulja s dodacima (aditivima) imaju bolja svojstva od čistih mineralnih. Dodaci služe za poboljšanje mazivosti i viskoznosti, sprječavaju autooksidaciju, koroziju, pjenjenje i rđanje, te omogućuju detergentno djelovanje i mazanje pri visokom tlaku. Tzv. »detergenti-disperzanti« osobito su potrebni za motorna ulja, jer sprječavaju nakupljanje taloga i izgorjelih čestica u motoru.

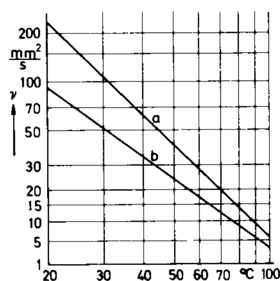
Neka se sintetska ulja (silikoni i sl.) sve više primjenjuju u suvremenoj tehnici zbog specijalnih svojstava.

Masti (za strojeve i valjne ležaje) su smjese sapuna i mineralnih ulja. Uglavnom razlikujemo litijeve i natrijeve masti; poznat je, međutim, cio niz posebnih masti izrađenih npr. na osnovu aluminijeva ili drugog sapuna. Natrijeve masti tvore s vodom emulziju pa izdrže više temperature.

*

Kvalitet maziva i mazivost prosuđujemo s obzirom na ovlaživanje i prianjanje na kovinske površine i otpornost prema starenju. Pri izboru maziva za određenu svrhu odlučna su fizikalna i kemijska svojstva: gustoća, viskoznost, plamište, krutište, kapljište, neutralizacijski broj i druga.

Gustoća pri 15 °C gotovo je za sva ulja manja od 1000 kg/m³. Kvalitetna stabilna ulja na parafinskoj osnovi imaju gustoću oko 870 kg/m³, naftna imaju nešto veću, a ulja s asfaltnom osnovom još veću gustoću. Sintetska ulja iz ugljenog katrana dosežu gustoću 1100 ... 1200 kg/m³. Općenito su gustoća i viskoznost tim manje što ugljikovodici, od kojih je sastavljeno dotično mineralno ulje, sadrže više vodika.



Dijagram ovisnosti viskoznosti v o temperaturi T
a — poluteško (srednje) ulje,
b — lako ulje.

Viskoznost je najvažniji podatak pri izboru ulja za određenu svrhu.

Mjere za viskoznost (kinematičku) – vidi str. 65. Viskoznost veoma ovisi o temperaturi te se s porastom temperature znatno smanjuje.

Za ležaje s velikom brzinom vrtnje i malim opterećenjem potrebno je ulje manje viskoznosti. Za veća opterećenja i pri višim pogonskim temperaturama (npr. u vrućim prostorijama) potrebno je ulje veće viskoznosti, a za promjenljive pogonske prilike potrebno je ulje s blago položenom krivuljom viskoznosti. Te osnovne upute treba uskladiti s uvjetima koji, svi zajedno, odlučuju o konačnom izboru najpravilnijeg maziva.

Plamište je temperatura pri kojoj se uljne pare prvi put zapale kad im se približavamo s otvorenim plamenom. Ako ulje nastavi dalje samo gorjeti, dosegli smo *gorište*, koje je 30 do 40 stupnjeva više od plamišta. Plamište moramo uzeti u obzir samo ako su pogonske temperature blizu plamišta. Ono veoma ovisi o tlaku; pri povećanom tlaku (npr. u kompresorima) plamište je znatno više, dok je pri sniženom tlaku (npr. u vakuum-pumpama) znatno niže.

Kapljište je temperatura na kojoj se pojavi prva kaplja tekuće masti kad se ona zagrijava u određenoj posudi. Mnoge se masti razgrađuju već mnogo prije nego su dosegle kapljište, pa zato ono mora biti znatno više od pogonske temperature ležaja.

Krutište je temperatura pri kojoj ulje više ne teče. Tim ocjenjujemo upotrebljivost ulja pri niskim temperaturama.

Penetracija je mjera za tvrdoću masti (tj. dubina do koje se, uz propisane uvjete, u uzorak masti utisne stožac određenih dimenzija.

Neutralizacijski broj. Zbog upotrebe ulja pri višim temperaturama i katalitičkog djelovanja kovina u prisustvu kisika iz zraka, u mineralnim se i zamašćenim uljima stvaraju nakon dužeg vremena slobodne organske kiseline, pa ulje »stari«. Neutralizacijski broj jest broj mg kalijeva hidroksida (KOH) koji je potreban da se neutraliziraju slobodne organske kiseline u 1 g ulja.

*

Budući da laboratorijska ispitivanja spomenutih fizikalnih i kemijskih karakteristika nisu uvijek dovoljna za ocjenu radnih svojstava, uvedena su i ispitivanja za specijalna maziva i neposredno na strojevima, a osobito na motorima s nutarnjim izgaranjem. Ispituju se odnosno ocjenjuju slijedeća svojstva: sposobnost prianjanja i debljina sloja maziva na plohama, oksidacijska stabilnost, detergentnost i dr. Te metode obično nisu standardizirane.

Ležajna, vretenska, osovinska i cirkulacijska ulja

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm²/s	Krutište 0 °C maks.	Plamište °C min.
Ležajno ulje – destilat (JUS B.H3.313...316 – 1956)				
		pri 50 °C		
lako	LD – 30	21... 38	–5	140
srednje	LD – 45	40... 52	–5	150
poluteško	LD – 60	55... 75	0	160
teško	LD – 100	80...110	0	170
Vretensko ulje (JUS B.H3.3000/301 – 1956) – za protočno mazanje				
		pri 20 °C		
lako	VL	20... 45	–15	130
teško	VT	60... 85	–15	130
Vretensko ulje – destilat (JUS B.H3.310/311 – 1956) – za protočno mazanje				
lako				
teško				
Osovinsko ulje (JUS B.H3.321/323 – 1956) – za osovine tračničkih vozila				
		pri 50 °C		
lako	OL	45... 60	–15	150
teško	OT	90...110	0	160
Cirkulacijsko ulje (JUS B.H3.230 – 1973) – za optočno mazanje				
		pri 50 °C		
super super lako	CP 2	1,6	–40	80
super lako	CP 3	3	–30	90
ekstra ekstra lako	CP 7	7	–20	110
ekstra lako	CP 9	9	–20	140
posebno lako	CP 14	14	–16	160
vrlo lako	CP 20	20	–15	165
lako	CP 27	27	–15	170
srednje	CP 37	37	–10	180
teško	CP 50	50	–10	200
vrlo teško	CP 75	75	–10	200
osobito teško	CP 100	100	–5	210
ekstra teško	CP 150	150	–5	215
ekstra ekstra teško	CP 215	215	–5	220
super teško	CP 300	300	–5	230
super super teško	CP 425	425	–5	230

Ulje za visoki tlak, zupčanike i zupčane prigone

Oznaka	Viskoznost mm²/s −17,8 °C	50 °C	98,9 °C	Krutište 0 °C maks.	Plamište °C min.
Ulje za visoki tlak (JUS B.H3.211 ... 215 - 1962)					
UVP — 75[1]	3268	22 ... 29		—20	150
UVP — 80[1]		53 ... 76	8,5 ... 12	—15	165
UVP — 90[2]		91 ... 190	14,2 ... 25,1	—12	180
UVP —140[2]			25,1 ... 42,9	—10	200
UVP —250[3]			42,9	0	220
Ulje za otvorene zupčanike (JUS B.H3.270 ... 272 — 1955)					
OZ 5			33	—	190
OZ 10			72	—	190
OZ 15			125	—	190
Ulje za zatvorene zupčane prigone (JUS B.H3.319 — 1973)					
ZU 40		40		—25	180
ZU 55		55		—20	190
ZU 80		80		—18	200
ZU 110		110		—15	210
ZU 150		150		—12	220
ZU 190		190		—12	230
ZU 230		230		—10	235
ZU 305		305		— 5	240
ZU 455		455		— 5	240
Ulje za mehaničke prigone motornih vozila (JUS B.H3.302/303 — 1973)					
MP 4 — 80	< 23000		9 ... 11,5	—20	170
MP 4 — 90	—		16,8 ... 19,2	—15	190
MP 4 —140	—		25,5 ... 31,5	— 8	210
MP 5 — 75	< 3300		> 4,2	—	150
MP 5 — 80	< 11000		9 ... 11,5	(—25)	160
MP 5 — 90	< 76000		16,8 ... 19,2	(—18)	180
MP 5 —140	—		25,5 ... 31,5	(— 7)	200

[1] — za zupčane prigone, [2] — za mjenjače i diferencijale, [3] — za pužne prigone.

Hidrauličko, kompresorsko, turbinsko i cilindarsko ulje

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm²/s	Krutište °C maks.	Plamište °C min.
Hidrauličko ulje (JUS B.H3.120 ... 128 — 1963) za uljno-hidrauličke naprave				
		pri 50 °C		
ekstra ekstra lako	HU-EEL	10 ... 12	—35	81
ekstra lako	HU-EL	12 ... 14	—30	100
vrlo lako	HU-VL	17 ... 21	—25	160
lako	HU-L	30 ... 34	—20	200
srednje	HU-S	38 ... 42	—15	210
teško	HU-T	49 ... 53	—10	220
vrlo teško	HU-VT	61 ... 75	—10	230
posebno teško	HU-NT	80 ... 95	—10	240
Kompresorsko ulje (JUS B.H3.151 ... 156 — 1962) — za stapne i rotacijske kompresore				
		pri 50 °C		
lako	KU-L	35 ... 50	—20	175
srednje	KU-S	52 ... 72	—15	185
teško	KU-T	75 ... 105	—10	195
vrlo teško	KU-VT	110 ... 140	— 5	215
posebno teško	KU-NT	150 ... 200	— 5	230
ekstra teško	KU-ET	220 ... 270	— 5	250
Ulje za rashladne kompresore (JUS B.H3.141 ... 144 — 1962) — za kompresore za NH_3, CO_2, SO_2, freone i sl.				
		pri 50 °C		
vrlo lako	KH-VL	10 ... 17	—40	135
lako	KH-L	18 ... 26	—35	160
srednje	KH-S	26 ... 36	—25	180
teško	KH-T	36 ... 50	—20	200
Turbinsko ulje (JUS B.H3.210 — 1976) — za vodne, parne i plinske turbine				
		pri 50 °C		
vrlo lako	TU-VL	16 ... 24	—10	180
lako	TU-L	25 ... 33	— 8	190
srednje	TU-S	34 ... 42	— 8	210
teško	TU-T	44 ... 52	— 8	220
Cilindarsko ulje (JUS B.H3.341 — 1956, 382 — 1970) — za parne cilindre				
		pri 100 °C		
za zasićenu paru	CU 250	30 ... 52	+ 5	250
za pregrijanu paru	CU 300	44 ... 55	+ 5	310

Motorao ulje
(JUS B.H3.129/139/149/169 — 1974)

Razdioba mineralnih motornih ulja po kvaliteti

Klasifikaciju API su (1970/71) zajednički izdali: API (American Petroleum Institute) i ASTM (American Society for Testing Materials)

Kvalitet po JUS	Klasifikacija API*	Karakteristika ulja	Upotreba	
A	SB	inhibirano	laki	benzinski motori
B	SD	inhibirano, detergentno	teži	
C	CC	jače detergentno	laki	dizel-motori
D	CD	jako detergentno	teži	

* Klasifikacija API poznaje još i kvalitete: SA, SC i SE (od SA do SE s porastom dodatka) te CA i CB (od CA do CD za povećani stupanj kompresije motora).

Motorno ulje za dvotaktne benzinske motore je ulje s dodacima, a upotrebljava se pomiješano s benzinom.

Razdioba po viskoznosti

Po SAE (Society of Automotive Engineers) motorna su ulja podijeljena u gradacije po viskoznosti (pri čemu nisu uzeti u obzir ni kvalitet ulja, ni ovisnost njegove viskoznosti o temperaturi).

Gradacija po SAE	Viskoznost mm^2/s —17,8 °C	98,9 °C	Krutište °C maks.	Plamište °C min.
Zimska ulja				
SAE 10 Z	2400	5,4 ... 7,3	—25	200
SAE 20 Z	9600	7,3 ... 9,6	—20	205
Ljetna ulja				
SAE 20	—	7,3 ... 9,6	—20	205
SAE 30	—	9,6 ... 12,9	—15	220
SAE 40	—	12,9 ... 16,8	—10	230
SAE 50	—	16,8 ... 22,7	—10	240

»Svesezonska ulja« obuhvaćaju viskoznošću više gradacija. (Ulje koje odgovara gradacijama SAE 10 Z i SAE 30, označeno je sa SAE 10 Z — 30).

Vazelinsko, izolacijsko ulje i ulje za obradu

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm^2/s		Krutište °C maks.	Plamište °C min.
Vazelinsko ulje, tehničko (JUS B.H3.160 ... 163 — 1958) — za precizne instrumente i lake radilice					
		pri 20 °C			
vrlo lako	VZT-VL	20 ... 37		—25	120
		pri 50 °C			
lako	VZT-L	12 ... 17		—20	120
srednje	VZT-S	18 ... 25		—15	140
teško	VZT-T	26 ... 42		—15	160
Izolacijsko ulje (JUS B.H3.561/562 — 1970)					
		pri —30 °C	pri 20 °C		
za transformatore	IU-T	1800	30	—45	130
		pri —15 °C	pri 20 °C		
za sklopke	IU-P	800	40	—30	140

Dielektrična čvrstoća izolacijskih ulja IU-T i IU-P iznosi: za nepreradeno ulje 30 kV, za preradeno ulje 50 kV.

Ulja i tekućine za obradu — za hlađenje i mazanje alata pri odvajanju čestica s kovina

Neemulgirajuća ulja (JUS B.H3.526 — 1973)

		Viskoznost pri 50 °C	Krutište	Plamište
neaktivna ulja	N 5	3,0 ... 6,5	—20	90
	N 10	6,5 ... 12	—20	100
	NEP	12 ... 37,5	—10	140
	NVEP	12 ... 37,5	—10	160
aktivna ulja	A 10	6,5 ... 12	—20	100
	A 25	12 ... 37,5	—10	140
	VA	12 ... 37,5	—10	140

Emulgirajuća ulja i sintetične tekućine (JUS B.H3.536 - 1974) - za emulzije s vodom u omjeru ulje/voda = 1 : 10 ... 1 : 40 (1 : 60), otopine u vodi u omjeru koncentrat/voda = 1 : 50 ... 1 : 1000.

Masti za mazanje

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm^2/s 50 °C	Penetracija (po gnječenju)	Krutište °C maks.	Kapljište °C min.
Masti za otvorene zupčanike (JUS B.H3.273/274 — 1955)					
teška	OZ-20	—	310 ... 340	—	—
vrlo teška	OZ-41	—	290 ... 310	—	—
Masti za visoki tlak i temperaturu – za klizne i valjne ležaje pri povišenim temperaturama i tlakovima (JUS B.H3.624 – 1974)					
vrlo meka	MVP-1	—	310 ... 340	—	175
meka	MVP 2	—	265 ... 295	—	180
srednja	MVP-3	—	220 ... 250	—	185
— za visoke temperature (JUS B.H3.644/648 — 1965)					
tvrda	MVT-4	—	175 ... 205	—	160
briketna	MVT-B	—	< 80	—	180
Masti na osnovi Li-sapuna (JUS B.H3.634 — 1974) — za više namjena					
vrlo meka	VM-1	> 40	310 ... 340	—15	175
meka	VM-2	> 40	265 ... 295	—15	180
srednja	VM-3	> 40	220 ... 250	—15	185
Masti na osnovi Na-sapuna (JUS B.H3.645 — 1974) — za valjne ležaje					
meka	MKL-2	> 35	265 ... 295	—15	140
srednja	MKL-3	> 35	220 ... 250	—15	150
Grafitirana mast (JUS B.H3.661 — 1970)					
srednja	LMG-3	> 37	200 ... 250	—15	95
Sadrži: 2 ... 4 % grafita, 8 % pepela, 2 % vode.					
Masti s molibdenovim disulfidom MoS_2 (JUS B.H3.666 — 1976)					
—	MMo-1	> 40	310 ... 340	—15	175
—	MMo-2	> 40	265 ... 295	—15	180
Sadrži: > 3 % MoS_2.					
Antikorozijski vazelin (JUS B.H3.681 — 1977)					
—	AV-55	—	200 ... 325	—	55
—	AV-65	—	90 ... 150	—	65
—	AV-75	—	30 ... 80	—	75

Izbor maziva *

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti: t — temperatura (°C), n — brzina vrtnje (okr./min)	Maziva po JUS
Ležaji		
Klizni ležaji		
— podmazivanje uljem, ručno ili mazalicama	$n < 50$	LD 100
	$n = 50 \ldots 200$	LD 60
	$n = 200 \ldots 700$	LD 45
— podmazivanje uljem, cirkulacijsko ili prstenom	$t > 0$ °C:	
	$n < 50$	CP-100
	$n = 50 \ldots 200$	CP-75
	$n = 200 \ldots 700$	CP-50
	$n = 700 \ldots 1500$	CP-37
	$n = 1500 \ldots 3000$	CP-20
	$n > 3000$	CP-7
	$t < 0$ °C	KH-S
— podmazivanje mašću	$t < 60$ °C:	
	mazalicama	LMG-3
	tlačno	MVP-2
	$t > 60$ °C	MKL-3
Valjni ležaji		
— podmazivanje uljem	$t = -25 \ldots 40$ °C	KH-T
	$t = 0 \ldots 60$ °C:	
	$n < 700$	CP-37
	$n = 700 \ldots 3000$	CP-20
	$n > 3000$	CP-7
	$t = 60 \ldots 90$ °C:	
	$n < 700$ °C	CP-100
	$n = 700 \ldots 3000$	CP-37
	$n > 3000$	CP-20
	$t > 90$ °C:	
	$n < 700$	CP-300
	$n = 700 \ldots 3000$	CP-215
	$n > 3000$	CP-75
— podmazivanje mašću	$t = -20 \ldots 125$ °C:	
	normalno opterećenje	VM-3
	veliko opterećenje	MVP-3

* Navedene su upute informativne. U pojedinim slučajevima, a napose pri većim zahtjevima, valja uzeti u obzir upute proizvođača stroja ili uređaja i proizvođača maziva.

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t — temperatura (°C) n — brzina vrtnje pogonskog zupčanika (okr./min) P — prenesena snaga (kW)	Maziva po JUS
Zupčani prijenosi		
Zatvoreni zupčanici	$t = -20 \ldots 20$ °C:	
	veliko opterećenje	ZU-80
	manje opterećenje	ZU-40
— podmazivanje cirkulacijsko	$t = 0 \ldots 70$ °C:	
	$n < 350$:	
	$P < 18$	ZU-55
	$P = 18 \ldots 65$	ZU-80
	$P > 65$	ZU-190
	$n = 350 \ldots 1000$:	
	$P < 11$	ZU-40
	$P = 11 \ldots 50$	ZU-55
	$P > 50$	ZU-80
— podmazivanje u uljnoj kupelji	$n < 350$:	
	$P < 18$	ZU-80
	$P = 18 \ldots 65$	ZU-190
	$P > 65$	ZU-305
	$n = 350 \ldots 1000$:	
	$P < 11$	ZU-55
	$P = 11 \ldots 50$	ZU-80
	$P > 50$	ZU-190
— podmazivanje cirkulacijsko ili u uljnoj kupelji	$n = 1000 \ldots 2500$:	
	$P < 7$	ZU-40
	$P = 7 \ldots 37$	ZU-55
	$P > 37$	ZU-80
	$n = 2500 \ldots 5000$:	
	$P < 4$	CP-20
	$P = 4 \ldots 15$	ZU-40
	$P > 15$	ZU-55
Otvoreni zupčanici	$t < 60$ °C	OZ 15
Pužni prijenosi	t — normalne	MP4-140
	— niske	MP4-80
Lanci i užad		
Gallovi lanci	t — normalne	MP4-90
	— niske	KH-T
Čelična užad	t — normalne i niske	OZ 5

(*nastavak*)

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t — temperatura (°C) n — brzina vrtnje (okr./min) P_1 — snaga po cilindru (kW)	Maziva po JUS
Vodne turbine		
Potporni ležaji		
— sa čvrstim potpornim prstenom	$t < 50$ °C srednja i velika opterećenja, mala i srednja brzina	TU-T
— s pomičnim segmentima	$t < 60$ °C: opterećenje $< 3{,}5$ N/mm²	TU-S
Horizontalni potporni i grebenasti ležaji	mala opterećenja, velika brzina	TU-S
Svornjaci statorskih lopatica, vodivi podvodni ležaji	$t < 15$ °C mala i srednja opterećenja	LMG-3
Glavine Kaplanovih turbina	servomotor u osovini	CP-300
	servomotor u glavini	TU-S
Parne turbine		
Ležaji	$n > 3000$	TU-VL
	$n = 1500 \ldots 3000$	TU-S
Stapni parni strojevi		
Cilindri	Temperatura pare:	
	$t_p < 320$ °C	CU-300
	$t_p < 260$ °C	CU 250
Dizel-motori (stabilni)		
Vertikalni motori		
— cilindri i ležaji	$P_1 < 120$ kW	D-SAE 30
	$P_1 > 120$ kW	D-SAE 40
Horizontalni motori		
— cilindri i ležaji	$P_1 < 40$ kW	D-SAE 20Z
	$P_1 > 40$ kW	D-SAE 30
Regulatori		
Protočni regulatori	t — normalne	TU-S
Tlačni regulatori	t — normalne	TU-S
	— niske	KH-L
Stapni kompresori za regulatore	$t > 10$ °C	KU-T
	$t < 10$ °C	KU-S

Izbor maziva (nastavak)

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t — konačna temperatura kompresije (°C) p — tlak (bar)	Maziva po JUS
Hidraulički strojevi		
Stapne pumpe	normalno opterećenje	HU-VL
Rotacijske pumpe	normalno opterećenje	HU-S
	veliko opterećenje	HU-VT
Stapni kompresori		
Cilindri i brtve		
— mali jednostepeni zračni kompresor	$p < 6$ bar: vani — zimi	KU-L
	— ljeti	KU-S
	unutra	KU-S
— višestepeni kompresor za zrak, N_2, CO, NH_3, C_2H_2 i sl.	$p < 100$ bar: $t < 140$ °C	KU-S
	$t < 160$ °C	KU-T
	$t < 190$ °C	KU-NT
	$t > 190$ °C	KU-ET
— kompresori za koksni ili rasvjetni plin	$t < 140$ °C	KU-S
	$t > 140$ °C	KU-T
— kompresori za metan, propan, butan	$t < 140$ °C	KU-T
— kompresori za vlažni zrak ili plin	$t < 135$ °C	KU-S
	$t > 135$ °C	KU-VT
— rashladni kompresori		
za NH_3 i CO_2		KH-S
za freon i CH_3Cl		KH-T
za SO_2		KH-T
Ležaji i pogonski mehanizam		
— cirkulacijsko podmazivanje		CP-75
— tlačno podmazivanje		CP-50
Rotacijski kompresori		
Jednostepeni	$p < 2,5$ bar $t < 140$ °C	KU-S
	$p > 2,5$ bar: $t < 180$ °C	KU-VT
	$t > 180$ °C	KU-ET
Dvostepeni	$p < 8$ bar $t < 140$ °C	KU-S
	$p > 8$ bar: $t < 180$ °C	KU-VT
	$t > 180$ °C	KU-ET
Alatni strojevi		
Vodila	malo opterećenje	LD-30
	veliko opterećenje	LD-60

TEHNOLOGIJA

Lijevanje

Modeli po kojima se izrađuju kalupi za lijevanje dijele se na:

– *Višekratno upotrebive modele* koje izrađujemo od kovine (čelik, sivi lijev, aluminij, mjed itd.), plasta, drveta ili sadre. Moraju biti dijeljivi i s kosim bočnim plohama da ih nakon kalupljenja možemo izvući iz pješčanog kalupa.

Jezgrenici su modeli za izradu pješčanih jezgara.

– *Jednokratno upotrebivi modeli* izrađuju se od voska (kojega po konačnoj izradi pješčanog kalupa istalimo zagrijavanjem) ili od plasta (UF ili pjenastoga PS koji se dodirom s vrućom talinom ispare).

Osnova za izradu modela je konstrukcijski nacrt. Pri dimenzioniranju modela valja uzeti u obzir kontrakciju lijeva pri skrućivanju i ohlađivanju. Stoga su dimenzije modela za nadmjeru povećane s obzirom na konstrukcijski nacrt.

Nadmjere lijevova (JUS K.H5.050 – 1959)

Lijev	Nadmjera % manji odljevci	Nadmjera % veći odljevci	Lijev	Nadmjera % manji odljevci	Nadmjera % veći odljevci
sivi lijev	1,0	0,75	lijevana bronca	1,5	1,3
			lijevana Al bronca	2,1	1,8
nodularni lijev					
– nežareni	2,0	1,5	lijevana mjed	1,7	1,5
– žareni	0,5	0,3	cinčani lijev	1,5	1,2
temperovani lijev			aluminijski lijev	1,2	1,0
– nežareni	2,0	2,0	– Al-Mg lijev – Al-Cu-Mg lijev	1,5	1,3
– bijeli, žareni	1,6	–			
– crni, žareni	0,5	0,5			
čelični lijev	2,0	1,8	magnezijski lijev	1,4	1,3
lijevani Mn čelici	2,3	2,3	bijela kovina	0,5	–

Na plohama, koje će biti obrađene, treba na modelu dodati za obradu:

Najveća dimenzija odljevka mm	Dodatak za obradu* u mm – za odljevke od sivog lijeva I	sivog lijeva II	čeličnog lijeva I	čeličnog lijeva II	neželjeznih kovina I	neželjeznih kovina II
... 200	2...3	3... 5	3... 4	6... 7	2...2	3... 4
200)... 300	2...3	5... 6	3... 4	7... 9	2...2	4... 5
300)... 500	3...4	6... 8	4... 5	9...12	3...3	5... 6
500)... 800	3...5	7... 9	4... 7	10...13	3...4	5... 7
800)...1200	4...6	8...10	6... 9	12...15	4...5	6... 8
1200)...1800	5...7	9...11	7...10	14...16	4...5	7... 9
1800)...2600	6...8	10...12	9...12	15...18	5...6	8...10
2600)...3800	–	11...14	–	16...21	–	9...11
3800)...5400	–	12...16	–	18...24	–	10...13
5400)...	–	14...18	–	24...30	–	12...16

* I – pri masovnoj izradi odljevaka, II – pri pojedinačnoj izradi

Zbog veće preglednosti pri izradi kalupa i upozorenje za koji je lijev predviđen pojedini model (nadmjere!) označuju se pojedine plohe na modelima posebnim bojama.

Boje modela

Površine modela i jezgrenika	Lijev sivi	nodularni	temperovani	čelični	lake kovine	teške kovine
površine na kojima ostaju odljevci neobrađeni	crveno	ljubičasto	sivo	modro	zeleno	žuto
površine na kojima će se odljevci obraditi	žute crte*	žute crte*	žute crte*	žute crte*	žute crte*	crvene crte*
mjesta za rashladne ploče i uložene trnove	modro	crveno	crveno	crveno	crveno	modro
sastavi dijeljenih modela	crni rub					
jezgreni oslonci	crno					

* Manje se plohe oboje tom bojom u cjelini.

Modeli nisu potrebni pri posebnom načinu lijevanja (tlačnom, kokilnom, centrifugalnom, kontinuiranom itd.).

Kalupi su pomoćno sredstvo u kojima se uljevena kovinska talina hlađenjem skrućuje u odljevak.

Kalupi moraju izdržati visoke temperature taline, ne smiju s njom reagirati, moraju biti i kod tih temperatura dovoljno čvrsti i porozni za odvođenje nastalih plinova. Razlikujemo:

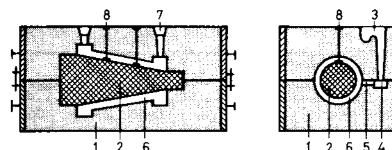
– *Kalupe za jednokratnu upotrebu,* koje izrađujemo nabijanjem ljevačkog pijeska.

Ljevački pijesak sastoji se pretežno od kremenih zrnaca (SiO_2), ima visoko talište (1720 °C) te postaje gnjecav tek povrh 1600 °C. Debljina zrna kreće se između 0,06 ... 0,5 mm (u ovisnosti od tražene glatkoće ploha odljevka i njegove veličine). Kremenova zrna sama su sipka. Vežemo ih dodatkom veziva. Najoubičajenije vezivo je glina (2 ... 30%) uz dodatak vlage (5 ... 15%). Po količini gline u ljevačkom pijesku razlikujemo suhi, polumasni i masni pijesak. Suhi pijesak ima najveću propustivost za plinove, ali manju čvrstoću. Upotrebljavamo ga npr. za jezgre (do 5% gline). Polumasni pijesak upotrebljavamo za svježe kalupe, a masni – najveće čvrstoće – za sušene kalupe. Osim posebnih vrsta anorganskih veziva (gline s određenim mješavinom Al_2O_3 i SiO_2 uz dodatke K, Mg i sl.) upotrebljavamo i organska veziva (uljna, škrobna, od plasta – PF, UF i sl.), naročito pri izradi jezgara i ljevačkih maski (za velike serije malih odljevaka – po Croningu).

Kalupljenje može biti ručno (pri pojedinačnoj izradi odljevaka i pri velikim odljevcima) ili strojno (pri masovnoj izradi manjih odljevaka).

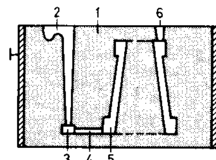
Pješčani kalupi

Dijeljeni kalup za model za višekratnu upotrebu:



1 – kalup
2 – jezgra
3 – ulijevak
4 – razvodnik
5 – privodnik
6 – odljevak
7 – pojilo
8 – jezgreni oslonac

Kalup za model (od plasta) za jednokratnu upotrebu:



1 – kalup
2 – ulijevak
3 – razvodnik
4 – privodnik
5 – odljevak
6 – pojilo (odušnik)

U pojilu (koje mora biti dovoljno veliko pri punim, debelim odljevcima) mora se talina održati tekućom (toplinskom izolacijom ili dodatnim zagrijavanjem) sve do skrućenja odljevka, da bi se spriječilo stvaranje lunkera u odljevku.

Za odvod zraka valja namjestiti na najvišim mjestima modela odušnike, koji mogu također preuzeti ulogu pojila. Pijesak u kalupu valja na mjestima probosti (zračnici), kako bi pri ulijevanju nastalim plinovima olakšali izlaz.

Pri dijeljenom okviru za kalup moramo gornji dio čvrsto spojiti s donjim dijelom, da se ne bi dignuo zbog hidrostatskog uzgona. Da uzgon u talini ne bi skrivio ili srušio jezgre, učvršćujemo ih osloncima i opteretimo utezima.

– *Kalupi za višekratnu upotrebu* izrađuju se od kovina, grafita ili keramike.

Kokile su kovinski kalupi (obično od čelika ili sivog lijeva) pomoću kojih je moguće izraditi vrlo točne odljevke (s toler. ±0,3 ... ±0,05 mm). U potpunim kokilama su i jezgre kovinske, u dijeljenim kokilama su jezgre od pijeska.

Talina se ulijeva u kokile otvorenim mlazom.

Zbog više cijene upotrebljavamo kokile pri masovnoj izradi odljevaka. Zbog velikih temperaturnih opterećenja je njihova primjena ograničena na izradu odljevaka od slitina nižeg tališta (Sn, Zn, Pb – Al, Mg, mjedi).

Centrifugalno lijevanje, pri kojem se talina zbog rotacije kokile sabere uz vanjsku njenu stijenku, prikladno je za izradu lijevanih koluta i cijevi.

Pri kontinuiranom lijevanju se kovinska talina ulijeva u obostrano otvorenu kokilu (zatvorenu samo pri početku postupka). Talina se u kokili skrućuje toliko, da nastane dovoljno čvrsta vanjska kora, koja omogućuje izvlačenje odljevka. Postupak je prikladan za kontinuirano lijevanje punih ili šupljih profila (u duljinama koje ograničava samo vanjski uređaj radnih prostorija).

Dozvoljeno odstupanje pri dimenzijama neobrad. odljevaka od sivog i čeličnog lijeva

Preporučene smjernice (pri dimenzijama bez propisanih tolerancija i za odljevke u pješčane kalupe). — Mjere u mm.

<table>
<tr><th rowspan="3">Nazivna mjera</th><th colspan="4">Sivi lijev
kalupljenje*</th><th colspan="4">Čelični lijev
kalupljenje*</th></tr>
<tr><th colspan="2">ručno</th><th colspan="2">strojno</th><th colspan="2">ručno</th><th colspan="2">strojno</th></tr>
<tr><th>vel.</th><th>deblj.</th><th>vel.</th><th>deblj.</th><th>vel.</th><th>deblj.</th><th>vel.</th><th>deblj.</th></tr>
<tr><td>... 6</td><td rowspan="5">+2
—1,5</td><td>±1,5</td><td rowspan="3">±1</td><td>±1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>6)... 10</td><td rowspan="2">±2,5</td><td rowspan="2">±2</td><td rowspan="2">+3
—2</td><td>±3</td><td rowspan="3">+3
—2</td><td rowspan="2">±2</td></tr>
<tr><td>10)... 18</td><td>±4</td></tr>
<tr><td>18)... 30</td><td rowspan="2">±3,5</td><td rowspan="2">+2
—1,5</td><td rowspan="2">±2,5</td><td rowspan="2">+4
—2</td><td>±5</td><td rowspan="2">±3</td></tr>
<tr><td>30)... 50</td><td>±7</td><td rowspan="2">+4
—2</td></tr>
<tr><td>50)... 80</td><td rowspan="4">+3
—2</td><td rowspan="2">±4,5</td><td rowspan="4">+2,5
—1,5</td><td rowspan="2">±3,5</td><td>+5
—3</td><td>±8</td><td rowspan="2">±4</td></tr>
<tr><td>80)... 120</td><td>+6
—3</td><td>±9</td><td rowspan="2">+5
—3</td></tr>
<tr><td>120)... 180</td><td rowspan="12"></td><td rowspan="12"></td><td>+7
—4</td><td>±11</td><td>±5</td></tr>
<tr><td>180)... 250</td><td>+8
—4</td><td>±12</td><td rowspan="2">+7
—4</td><td rowspan="2">±6</td></tr>
<tr><td>250)... 315</td><td rowspan="2">+4
—3</td><td rowspan="2">+3
—2</td><td>+9
—4</td><td>±13</td></tr>
<tr><td>315)... 400</td><td rowspan="2">+10
— 5</td><td>±15</td><td rowspan="2">+8
—4</td><td>±7</td></tr>
<tr><td>400)... 500</td><td rowspan="2">+6
—4</td><td rowspan="2">+4,5
—2,5</td><td>±16</td><td>±8</td></tr>
<tr><td>500)... 630</td><td>+11
— 6</td><td rowspan="7"></td><td rowspan="2">+9
—5</td><td rowspan="7"></td></tr>
<tr><td>630)... 800</td><td rowspan="2">+7
—5</td><td rowspan="2">+5
—3</td><td>+12
— 6</td></tr>
<tr><td>800)...1000</td><td>+13
— 7</td><td rowspan="2">+11
— 6</td></tr>
<tr><td>1000)...1250</td><td rowspan="2">+10
— 7</td><td rowspan="2">+6
—4</td><td>+15
— 8</td></tr>
<tr><td>1250)...1600</td><td>+16
— 8</td><td rowspan="2">+14
— 7</td></tr>
<tr><td>1600)...2000</td><td rowspan="2">+13
— 9</td><td rowspan="2">+8
—5</td><td>+18
— 9</td></tr>
<tr><td>2000)...2500</td><td>+20
—10</td><td></td></tr>
</table>

* vel. — odstupanje pri veličini odljevka (promjer, širina, duljina); deblj. — odstupanja pri debljini stijenki.

Dozvoljena odstupanja pri dimenzijama za neobrađene odljevke neželjeznih kovina

Preporučene smjernice (pri dimenzijama bez propisanih tolerancija i za odljevke u pješčanim kalupima). – Mjere u mm.

<table>
<tr><th rowspan="3">Nazivna mjera</th><th colspan="4">Odljevci teških kovina
kalupljenje</th><th colspan="4">Odljevci lakih kovina
kalupljenje</th></tr>
<tr><th colspan="2">ručno</th><th colspan="2">strojno</th><th colspan="2">ručno</th><th colspan="2">strojno</th></tr>
<tr><th>vel.</th><th>deblj.</th><th>vel.</th><th>deblj.</th><th>dij.</th><th>jez.</th><th>dij.</th><th>jez.</th></tr>
<tr><td>... 6</td><td rowspan="3">±1,5</td><td>±1,5</td><td rowspan="4">±1,5</td><td>±1</td><td>±1,2</td><td>±1,6</td><td>±0,6</td><td>±0,8</td></tr>
<tr><td>6)... 10</td><td>+2
−1,5</td><td>+1,5
−1</td><td>±1,6</td><td>±2,3</td><td>±1,2</td><td>±1,5</td></tr>
<tr><td>10)... 18</td><td>+2,5
−1,5</td><td>+2
−1,5</td><td>±2</td><td>±3</td><td>±1,8</td><td>±2,2</td></tr>
<tr><td>18)... 30</td><td>±2</td><td>+3
−2</td><td>±2</td><td>jedn.</td><td>sast.</td><td>jedn.</td><td>sast.</td></tr>
<tr><td>30)... 50</td><td rowspan="2">±2,5</td><td>+3,5
−2,5</td><td rowspan="2">±2</td><td>+2,5
−2</td><td>±1</td><td>±1,6</td><td>±0,8</td><td>±1</td></tr>
<tr><td>50)... 80</td><td>+4,5
−3</td><td>+3
−2</td><td>±1.2</td><td>±1,9</td><td>±0.9</td><td>±1,2</td></tr>
<tr><td>80)...120</td><td rowspan="3">±3,5</td><td>+5
−4</td><td rowspan="3">±3</td><td rowspan="5"></td><td>±1.4</td><td>±2,2</td><td>±1,1</td><td>±1,4</td></tr>
<tr><td>120)...180</td><td rowspan="4"></td><td>±1,6</td><td>±2.5</td><td>±1,2</td><td>±1.6</td></tr>
<tr><td>180)...250</td><td>±1,8</td><td>±2,9</td><td>±1,4</td><td>±1,8</td></tr>
<tr><td>250)...315</td><td rowspan="2">±4</td><td rowspan="2">±3,5</td><td>±2</td><td>±3,2</td><td>±1,6</td><td>±2</td></tr>
<tr><td>315)...400</td><td>±2,2</td><td>±3.6</td><td>±1,8</td><td>±2,2</td></tr>
</table>

Oznake za odstupanja:

vel. – za veličinu odljevka; deblj. – za debljinu stijenki; dij. – pri dijeljenom kalupu; jez. – za kalupe s jezgrama; jedn. – pri jednodijelnim kalupima; sast. – pri sastavljenim kalupima.

Čišćenje odljevaka

Postupak čišćenja odljevaka:

- istresanje pijeska obavlja se ručno ili strojno (vibratorima);
- grubim čišćenjem odstranjuje se sav pijesak i to ručno i/ili strojno (pneumatskim dlijetima, u okretnim bubnjevima, pjeskaranjem kremenovim ili čeličnim zrnjem – pneumatski ili mehaničkim bacačima, vodenim mlazom – 25 ... 150 bar);
- priljevci (ulijevci i pojila) odstranjuju se piljenjem, plamenim ili lučnim rezanjem, brusnom pločom;
- brušenjem se poravnavaju neravnosti ploha po odstranjenju priljevaka i sl.

Eventualne greške odljevaka popravljaju se isjecanjem ili zavarivanjem.

Plastična obrada

Plastična obrada – preoblikovanje – je radni postupak u kojem krutom kovinskom materijalu (sirovom odljevku ili već prije preoblikovanom poluproizvodu, npr. limu) plastičnom (trajnom) deformacijom promijenimo oblik, pri čem se ujedno promijeni i struktura materijala.

Preoblikovanje se zbiva u području prisilnog tečenja kovine ili slitine. S obzirom na temperaturu preoblikovanja razlikujemo:

– preoblikovanje u hladnom, tj. pod temperaturom rekristalizacije, pri čem materijal očvrsne (povećavaju se čvrstoća i tvrdoća uz smanjenje rastegljivosti),

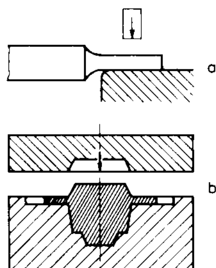
– preoblikovanje u toplom, tj. nad temperaturom rekristalizacije, pri čem materijal ne očvrsne, jer se pritom nastala naprezanja usput gube.

Porastom deformacije rastu i naprezanja u materijalu. Pri prevelikoj deformaciji materijal se kida. Stoga je veličina deformacije pri preoblikovanju ograničena. Naprezanja, koja nastaju zbog očvršćivanja pri preoblikovanju u hladnom, mogu se žarenjem odstraniti, nakon čega se materijal može dalje preoblikovati. Na taj način možemo postepenim preoblikovanjem i međužarenjem postići vrlo velike deformacije materijala.

Značajna je brzina deformacije. Pri malenoj brzini deformacije materijal će se prognječiti do u dubinu presjeka, pri velikoj brzini stići će deformacija samo do manjih dubina.

Najznačajniji su primjeri preoblikovanja:

Kovanje

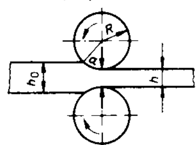


Kvalitetne dijelove kompliciranih oblika i s velikim razlikama presjeka izrađujemo najjednostavnije kovanjem valjanih profila (štapova, traka) u otkovke. Kujemo obično u toplom. Pri kovanju u hladnom materijal jako očvrsne, a tada su moguće samo male deformacije.

Slobodno kovanje (a) – ručno ili strojno – sastoji se iz velikog broja udaraca, a upotrebljava se pri pojedinačnoj izradi i pri velikim otkovcima.

Kovanje u kalupu (b) sastoji se iz manjeg broja udaraca, daje točnije dimenzije otkovka, a upotrebljava se pri masovnoj izradi.

Valjanje



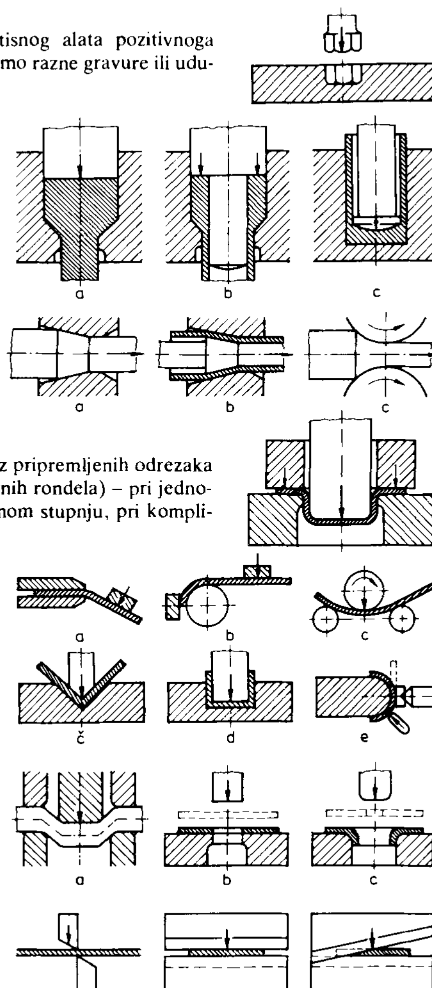
Pri valjanju lima ili profila među dvama valjcima smanjujemo debljinu izratka za razliku Δh ($= h_0 - h$) koja je ovisna od promjera valjaka $2R$ i koeficijenta trenja μ

$$\Delta h \leqq 2R(1 - \cos\alpha) = 2R(1 - 1/\sqrt{\mu^2 + 1})$$

Fino valjanje (»glačanje«) je fina obrada tokarenih ili brušenih kovinskih ploha plastičnom deformacijom pri kojoj površinski sloj jako očvrsne.

Utiskivanje

Utiskivanje patrice (utisnog alata pozitivnoga oblika) u materijal izrađujemo razne gravure ili udubine (negativnog oblika).



Istiskivanje

Hladnim istiskivanjem materijala kroz matricu (istosmjerno – a, b) ili protiv patrice (protusmjerno – c) oblikujemo štapove, profile, cijevi (u prvom redu od Sn, Pb, Zn, Al, Cu i sl.).

Vučenje (kalibriranje)

Vučenjem odvaljaka kroz matrice (a, b) ili valjke (c) dobivamo vučene profile i žicu.

Duboko izvlačenje

Duboko izvlačimo lim iz pripremljenih odrezaka (platina odn. kružno izrezanih rondela) – pri jednostavnim proizvodima u jednom stupnju, pri kompliciranijim u više stupnjeva.

Savijanje

Savijamo u prvom redu lim i trake i to: slobodno (a, b), pomoću valjaka (c), u kalupima (č, d) ili postepenim razvlačenjem preko modela (e).

Smično preoblikovanje

Smično preoblikovanje upotrebljavamo npr. za savijanje štapa u koljenčastu osovinu (a), stvaranje rupa u limu – čistih (b) ili s prirubom (c).

Odrezivanje

Odrezivanje je postupak pri kojem smičnim opterećenjem odvajamo čestice izratka.

Oblikovanje plasta

Veći je dio oblikovanih proizvoda i poluproizvoda od plasta – termoplast; od duroplasta ih je manje.

Termoplaste možemo lijevati (težinskim ili centrifugalnim postupkom), no mnogo više ih oblikujemo tlačnim lijevanjem u kokilama (proizvode kabastog oblika) ili istiskivanjem kroz sapnice (profile, cijevi, ploče). Dodatnim razvlačenjem izrađuju se folije (debljine 0,02 ... 0,3 mm).

Duroplaste lijevamo ili prešamo u kalupima (tlakom 150 ... 1000 bar pri temperaturama alata 140 ... 180 °C).

Primarni oblik plasta za preradu su prašak i zrnje.

Pri tlačnom lijevu i istiskivanju materijal se potiskuje pužnim vijkom ili klipom, a za prešanje upotrebljavaju se preše (tijeskovi) i to: ručne (50 ... 800 kN), mehaničke (400 ... 1500 kN) ili hidrauličke (150 ... 10000 kN).

SINTEROVANJE

Sinterovanjem spajamo materijale (kompozite) iz komponenata koji se drugim tehnološkim metodama ne daju spajati (ili veoma teško).

Mješavinu komponenata u obliku prašine (veličine zrna 1 ... 500 µm) ponajprije stisnemo (hladno ili vruće) velikim tlakom (1 ... 10 kbar) u konačni oblik, da bi ih nato pri visokim temperaturama sinterovali (difuzijski stopili).

Temperature sinterovanja su: za bakrene slitine 600 ... 800 °C, za željezne slitine 1000 ... 1300 °C, za karbidne tvrde metale 1400 ... 1600 °C, za Mo, W, Ta i sl. 2000 ... 2900 °C.

Veličinom zrna komponenata, tlakom pri tlačenju i temperaturom sinterovanja utičemo na poroznost sastavljenoga materijala:

volumenski udio pora	upotreba
do 60%	– filteri
do 30%	– klizni ležaji
15 ... 20%	– strojni dijelovi
do 5%	– vrlo čvrsti strojni dijelovi

Primjeri upotrebe:

– karbidni tvrdi metali: sinterovanje tvrdih i krhkih volframovih, molibdenovih ili tantalovih karbida žilavim vezivom, npr. kobaltom;

– »dijamantne kovine«: sinterovanje dijamantnog zrnja (ili drugih tvrdih tvari, npr. korunda) kovinskim vezivom;

– slitine komponenata vrlo raznolikih tališta: sinterovanje kovina razmjerno visokog tališta (Fe, Ni, Co) s kovinama vrlo niskih tališta (Zn, Cd, Pb);

– slitine za filtere i klizne ležaje: sinterovanje kovina i kovinskih spojeva željene poroznosti (kod ležaja valja pore napojiti uljem);

– slitine za četkice kolektorskih električnih strojeva: sinterovanje grafita (klizavost) i bakra (vodljivost);

– slitine za električne kontakte: sinterovanje volframa ili molibdena (tvrdoća) s bakrom ili srebrom (vodljivost).

ZAVARIVANJE KOVINA

Zavarivanje pritiskom (JUS C.T3.001 — 1971)

1. Kovačko zavarivanje. Dijelove zagrijemo u peći do bijelog žara, dezoksidiramo površine (npr. boraksom) te ih zavarimo udarcima čekićem.

2. Plameno zavarivanje pritiskom. Dijelove zagrijemo plamenom te ih zavarimo pritiskom.

3. Aluminotermijsko zavarivanje pritiskom. Dijelove zagrijemo toplinom egzotermne reakcije aluminija s oksidom kovine, koja se zavaruje, te ih zavarimo jakim pritiskom u prešama.

4. Čeono zavarivanje električnim otporom

a) *Zavarivanje pritiskom* je postupak u kojem propuštamo jaku električnu struju kroz oba dijela što ih zavarujemo, a koji su u stalnom dodiru. Na mjestu dodira stvara se Jouleova toplina pa se dodirno mjesto jako ugrije. Kad se postigne temperatura zavarivanja, oba dijela zavarimo jakim pritiskom.

b) *Zavarivanje iskrenjem* je postupak pri kojem propuštamo električnu struju kroz oba dijela što ih zavarujemo, a koji se izmjenično dotiču i razmiču, tako da se pojavi iskrenje zbog kojega se dodirno mjesto jako zagrije. Kad se dostigne temperatura zavarivanja, oba dijela zavarimo jakim pritiskom.

5. Preklopno zavarivanje električnim otporom

a) *Točkasto zavarivanje* je zavarivanje dvaju dijelova stisnutih između dva pritiskivača, kroz koje dovodimo električnu struju. Dodirno se mjesto obaju dijelova ugrije Jouleovom toplinom te se zavari pod pritiskom. To ponavljamo na limu u stanovitim razmacima — po točkama.

b) *Kolutno zavarivanje* srodno je točkastom zavarivanju, ali su pritiskivači izvedeni u obliku koluta koji valjanjem po dijelovima što ih treba zavariti daju neprekinut zavar.

c) *Bradavičasto zavarivanje* je točkasto zavarivanje na pojedinim posebno ispupčenim mjestima lima (bradavicama) kroz koja prelazi električna struja.

6. Indukcijsko zavarivanje. Dijelove zagrijemo visokofrekventnom strujom te ih zavarimo pritiskom.

7. Zavarivanje trenjem. Dijelove zagrijemo trenjem između dodirnih ploha mirujućeg i rotirajućeg dijela te ih zavarimo pritiskom.

8. Hladno zavarivanje. Dijelove dovedemo do tjesnog dodira te ih jako stisnemo. Pri tom se pojavljuje međusobno prodiranje elementarnih čestica iz jednog dijela u drugi pa se oni kovinski spoje.

9. Zavarivanje ultrazvukom. Dijelovi se zagriju toplinom trenja zbog ultrazvučnog titranja, a zatim ih zavarimo pritiskom.

10. Zavarivanje difuzijom je spajanje kovina u krutom stanju u određeni čas pri odgovarajućoj temperaturi i umjerenom pritisku. Uvjet za uspješan difuzijski proces je vrlo čista dodirna površina, a katkada i zaštitna atmosfera.

11. Zavarivanje eksplozijom je spajanje dvaju dijelova pritiskom što ga stvara sila eksplozije.

Zavarivanje taljenjem (JUS C.T3.001 — 1971)

1. Ljevačko zavarivanje upotrebljavamo uglavnom za popravak pokvarenih odljevaka. Pokvareni dio, ugrađen u poseban kalup, prelijevamo taljevinom dok se mjesto kvara ne zatali.

2. Aluminotermijsko zavarivanje taljenjem. Termitni prašak, smjesa aluminija i željeznog oksida u prahu, izgara pri visokoj temperaturi uz oksidaciju aluminija i oslobađanje željeza iz željeznog oksida. Rastaljenim se željezom zavaruju čelični dijelovi.

3. Zavarivanje plamenom. Za stvaranje plamena služe acetilen, rasvjetni plin, vodik ili teški ugljikovodici (benzen, teški benzin) s kisikom ili zrakom. Najbolji plamen daje acetilen s kisikom. Kao dodatni materijal služe žice za zavarivanje koje talimo u plamenu.

4. Lučno zavarivanje kovinskom elektrodom

Plameni luk nastaje između kovinske elektrode i predmeta koji zavarujemo. Ako se elektroda tali, služi još i kao dodatni materijal. Kovinske elektrode koje se ne tale (volfram), služe samo za stvaranje električnog luka, a ako je potreban dodatni materijal, dobiva se taljenjem dodatne žice u plamenom luku.

a) *Lučno zavarivanje u slobodnoj atmosferi*

— golom elektrodom
— elektrodom s plaštem
— elektrodom s jezgrom
— položenom elektrodom

b) *Lučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi*

— u inertnom plinu (Ar, He itd.)
volframovom (»tungsten«) elektrodom (postupak TIG)
kovinskom (»metal«) elektrodom (postupak MIG)
— u ugljičnom dioksidu (CO_2)
kovinskom elektrodom (postupak MAG — CO_2)
— u vodenoj pari ili smjesi zaštitnih plinova
— pod zaštitnim prahom (postupak EPP)
— pod zaštitom vodika atomiziranjem (disocijacijom vodikovih molekula i njihovim ponovnim spajanjem, što povisuje temperaturu na mjestu zavarivanja).

5. Lučno zavarivanje ugljenom elektrodom

Plameni luk nastaje između dviju ugljenih elektroda ili između elektrode i predmeta koji zavarujemo. Po potrebi dodajemo — žicom za zavarivanje — još i dodatni materijal. Postupak se može obavljati u slobodnoj ili zaštitnoj atmosferi, a upotrebljava se za tanke limove i za kutne zavare.

6. Zavarivanje pod troskom

Proces počinje kao kod postupka EPP. Kad se skupi dovoljno troske koja pokriva rastaljenu kovinu, ugasi se plameni luk, a dodatnu žicu, koju primičemo, talimo Jouleovom toplinom što se razvija pri prolasku električne struje kroz trosku.

7. Posebni postupci zavarivanja

a) *Zavarivanje elektronskim snopom*

Kinetička se energija ubrzanih elektrona pri udaru u kovinu pretvara u toplinu kojom talimo materijal.

b) *Zavarivanje plazmom*

Kovinu talimo toplinskom energijom plazmenog luka. (Plazma nastaje disocijacijom i ionizacijom plina.) Rastaljenu kovinu štitimo zaštitnim plinom.

c) *Zavarivanje laserom*

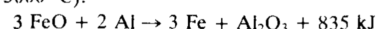
Kovinu talimo usmjerivanjema laserskog snopa na mjesto zavarivanja. Ne može se zavarivati neprekinuto, već samo u točkama. Mogu se zavarivati vrlo sitni predmeti.

Aluminotermijsko zavarivanje

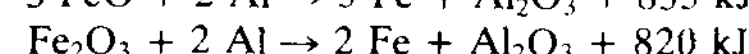
Aluminotermijsko zavarivanje je postupak zavarivanja kemijskom energijom koja se oslobađa pri eksotermijskoj reakciji među aluminijem i željeznim oksidima.

Reakcijska smjesa – termit – sastoji se od jednog dijela aluminijskog praška i triju dijelova željeznih oksida (okujina) – kao eksotermijskog dijela smjese – te sitnih čeličnih otpadaka i legirnih dodataka – za dodatnu kovinsku masu.

Pri eksotermijskoj reakciji (redoks) termita reducira aluminij željezne okside te i sam oksidira, pri čem se oslobađa znatna toplina (temperatura dostiže 2800 . . . 3000 °C):



$$3\,FeO + 2\,Al \rightarrow 3\,Fe + Al_2O_3 + 835\ kJ$$



$$Fe_2O_3 + 2\,Al \rightarrow 2\,Fe + Al_2O_3 + 820\ kJ$$

Postupak je prikladan za zavarivanje teških strojnih dijelova, tračnica i sl.

Otporno zavarivanje

Za zavarivanje potrebna toplina stvara se u dodiru među dijelovima koje treba zavariti kao Jouleova toplina

$$Q = UIt = I^2Rt$$

gdje su: U – napon, I – struja, R – električni otpor i t – vrijeme.

U međusobnom dodiru obaju dijelova može se postići temperatura 1260 . . . 1480 °C, što je dovoljno da se materijal pod pritiskom zavari.

Debljina pojedinog lima mm	Promjer elektrode mm	Debljina pojedinog lima mm	Pritisak elektrode N	
			čisti lim	oksidirani lim
0,1 . . . 0,3	5	0,5	400	800
0,4 . . . 1,0	6 . . . 8	1	500	1000
		2	800	1500
1,2 . . . 2,0	8 . . . 10	3	1200	1900
3	10 . . . 12	4	1500	2400
		5	1900	2900
iznad 3	12 . . . 15	6	2300	3500

Zavarivanje plamenom

Žice za zavarivanje plamenom (JUS C.H3.051 – 1981)

Za zavarivanje plamenom čelika upotrebljavamo čelične žice koje se označuju dvostrukom oznakom i to:

– općom oznakom P– i

– dodatnom oznakom s tri simbola koji označuju mehanička svojstva žice i to (redom): vlačnu čvrstoću R_m u N/mm², postotno produljenje A u % i prekidnu energiju (udarnu žilavost) KV u J:

Čvrstoća R_m N/mm²	Simbol	Postotno produljenje A %	Simbol	Prekidna energija KV J	Simbol
–	O	–	O	–	–
340	Z	14	Z	30	Z
340	Y				
400	1	14	1	30	1
430	2	18	2	60	2
470	3	22	3	90	3
510	4	26	4	120	4
550	5	30	5	150	5
590	6				

Primjer:

svojstva žice: R_m = 480 N/mm², A = 29%, KV = 100 J

oznaka: P-343

Promjeri žica: (1,0) (1,6) 2,0 2,5 3,15 4,0 5,0 6,3 mm.
Duljina žica: u komadima od 1000 mm, u svicima do mase 40 kg.

Zavarivanje acetilenskim plamenom

Debljina predmeta mm	Kisik pretlak bar	Kisik potrošak l/h	Acetilen potrošak l/h	Brzina zavarivanja m/h čelik	Brzina zavarivanja m/h lake kov.
0,2...0,5	0,5	50	50	10...12	12...15
0,5...1	0,75	85	75	7...10	8...12
1...2	1	165	150	6...8	7...9
2...4	1,25	325	300	5...7	4...8
4...6	1,5	500	475	4...6	4...6
6...9	1,75	750	700	3...5	2...3
9...14	1,75	1200	1100	2...3,5	1...2
14...20	2	1700	1600	1,5...2,5	0,6...1,2
20...30	2,25	2500	2350	1...2	–
30...50	2,25	3500	3300	0,7...0,9	–
50...70	3	4750	4500	0,5...0,7	–
70...100	3,5	7350	7000	0,3...0,5	–

Zavarivanje vodikovim plamenom

Debljina predmeta mm	Kisik pretlak bar	Kisik potrošak l/h	Potrošak vodika l/h	Brzina zavarivanja m/h
0,2...0,5	0,75	35	140	7...10
0,5...1	1	75	300	6...9
1...2	1	150	675	4...7
2...4	1,25	300	1350	3...5
4...6	1,5	500	2250	2...3,5

Zavarivanje plamenom rasvjetnog plina

Debljina predmeta mm	Kisik pretlak bar	Kisik potrošak l/h	Potrošak rasvjetnog plina l/h	Brzina zavarivanja m/h
0,2...0,5	1	80	200	4...7
0,5...1	1,25	130	350	2...5
1...2	1,5	270	600	1,5...3
2...3,5	1,75	500	1200	1...2

Rezanje kovina

Rezanje kovina plamenom (»autogeno«) upotrebljava se za čelik, pri čemu se iskorištava toplina izgaranja (oksidacijska) željeza. Upotrebljavamo gotovo sam kisik.

Posebno se lako plamenom reže nelegirani ili slabo legirani meki čelik C < 0,3%, pri tvrđem čeliku C > 0,5% je rezanjem plamenom moguće jedino dodatnim zagrijavanjem. Rezanje plamenom legiranih čelika ovisno je od pojedinih legirnih komponenata.

Različiti posebni postupci rezanja plamenom omogućuju rezanje i u slučajevima kad običan postupak nije upotrebljiv.

Rezanje plamenom nelegiranih čelika

Debljina predmeta mm	Kisik pretlak bar	Kisik potrošak l/m	Potrošak acetilena l/m	Brzina rezanja m/h
5	2,0	65	13,0	22
10	3,0	120	20,0	19,5
20	4,0	215	22,5	16
50	5,0	580	57,0	11
100	7,5	1240	111,0	7,5
150	9,0	2180	155,0	6
200	10,0	3125	190,0	5
300	13,0	5650	258,0	3,75

Sivi lijev, bakar i lake kovine režemo protaljivanjem plamenom ili elektrodom (rezne površine nisu osobito čiste).

Elektrolučno zavarivanje

Za elektrozavarivanje čelika upotrebljavaju se čelične elektrode. S obzirom na vanjštinu razlikujemo
- gole elektrode,
- elektrode s jezgrom,
- elektrode s plaštem (obložene).

Obložene elektrode za ručno zavarivanje nelegiranih ili slabo legiranih čelika s malo ugljika (JUS C.H3.011 – 1982)

Oznaku elektrode sastavljaju:
- opća oznaka,
- oznaka mehaničkih svojstava,
- oznaka tipa plašta,
- oznaka iskoristivosti,
- oznaka položaja zavarivanja,
- oznaka vrste struje.

1) Opća oznaka elektrode je: E

2) Oznaka mehaničkih svojstava:

Vlačna čvrstoća R_m, N/mm^2	Postotno produljenje A % min.	Temperatura koja odgovara udarnoj žilavosti KV = 28 J °C	Oznaka
430...510	–	–	430
	20	+20	431
	22	0	432
	24	−20	433
	24	−30	434
	24	−40	435
510...610	–	–	510
	18	+20	511
	18	0	512
	20	−20	513
	20	−30	514
	20	−40	515

3) Oznaka vrste plašta

Vrsta plašta	Oznaka	Vrsta plašta	Oznaka
kiseo	A	oksidan	O
kiseo – rutilan	AR	rutilan – osrednje debeo (TiO_2)	R
bazičan	B	rutilan – debeo	RR
celulozan	C	ostale vrste	S

4) Iskoristivost (JUS C.H3.020 – 1982) je omjer kovinske mase rastaljene dodatne tvari i ukupne mase (jezgre i plašta) ispitivane elektrode. Oznaka iskoristivosti navodi se samo u slučaju, ako je njena vrijednost veća od 105% i to uvijek zaokruženo na pune desetice, tj.:

110 – 120 – 130 – 140 itd.

5) Oznaka položaja zavarivanja:

Položaj pri zavarivanju	Oznaka
svi položaji	1
svi položaji osim okomito prema dolje	2
svi sučelni i kutni položaji u horizontalnom i horizontalno okomitom položaju	3
svi sučelni i kutni spojevi u horizontalnom položaju	4
svi položaji u koritastom položaju	5

6) Oznaka vrste struje

Istosmjerna struja preporučen polaritet	Izmjenična struja nazivni napon praznog hoda	Oznaka
+		0
+ ili −	50 V	1
−	50 V	2
+	50 V	3
+ ili −	70 V	4
−	70 V	5
+	70 V	6
+ ili −	90 V	7
−	90 V	8
+	90 V	9

Tablica vrijedi za elektrode promjera $d \geqq 2{,}5$ mm. Pri manjim je promjerima potreban viši napon praznog hoda.

7) Za bazične elektrode (B) označuje se i količina vodika u čistoj kovini zavara:

Količina vodika u ml u 100 g čiste kovine zavara ml/100 g	Oznaka
3...5	H
1...3	2 H
1	3 H

Primjeri za oznake elektroda:

– Oplaštena elektroda s rutilnim plaštem osrednje debljine, vlačne čvrstoće R_m iznad 500 N/mm^2, postot. produljenja A iznad 23% i udarne žilavosti KV iznad 71 J pri +20 °C i iznad 20 J pri −20 °C, za zavarivanje u svim položajima izmjeničnom strujom i s naponom praznog hoda 50 V ili istosmjernom strujom na pozitivnom polu:

oznaka elektrode: E 43 2 **R** 13

– Oplaštena elektroda s bazičnim plaštem, vlačne čvrstoće R_m iznad 560 N/mm^2, postot. produljenja A iznad 22% i udarne žilavosti KV iznad 47 J pri −20 °C, iskoristivosti 158%, za zavarivanje u svim položajima osim okomito prema dolje pomoću istosmjerne struje, uz količinu vodika u čistoj kovini zavara 1...2 ml/100 g:

oznaka elektrode: E 51 3 B 160 20 2H

Elektrode s plaštem za ručno zavarivanje sivog lijeva
(JUS C.H3.016 – 1984)

Oznaku elektroda tvore:

- opća oznaka
- oznaka kemijskog sastava
- oznaka vrste plašta
- oznaka položaja zavarivanja i vrsta struje.

1) Opća oznaka elektrode: E.

2) Oznaka kemijskog sastava:

Vrsta elektrode: skupina	Vrsta elektrode: karakteristični sastav* u %	Vrsta slitine čiste kovine zavara	Oznaka elektrode
na osnovi željeza	Fe + 3,4 C; 2,9 Si	sivi lijev	FeC 1
	Fe + 0,15 C; 0,03 Si	sivi lijev, legiran iz plašta čelik	FeC 2 Fe
na osnovi nikla	Fe + 53 Ni; 4,0 Si	slitina nikla i željeza	NiFe
	55 Ni; 40 Cu; 4,5 Fe 65 Ni; 30 Cu; 4,5 Fe	slitina nikla i bakra	NiCu 1 NiCu 2
	85 Ni; 8 Fe; 4,0 Si	nikal	Ni
na osnovi bakra	Cu + 10 Al	aluminijska bronca	CuAl
	Cu + 5 Sn Cu + 8 Sn	kositrena bronca	CuSn 1 CuSn 2

* Navedene su zaokružene prosječne vrijednosti karakterističnih sastavina. Podroban kemijski sastav svih navedenih elektroda vidljiv je u standardu JUS C.H3.016 – 1984.

3) Oznaka vrste plašta:

Vrsta plašta	Oznaka
bazičan	B
grafitan	G
bazičan s grafitom	BG
na osnovi soli i celuloze	S
ostale vrste	V

4) Oznaka položaja zavarivanja i vrsta struje

Ovdje vrijede jednake oznake kao kod elektroda za zavarivanje čelika – vidi str. 627 (pod 5 i 6).

P r i m j e r oznake elektrode:

Elektroda s plaštem sa čistom kovinom zavara FeNi (55/45%), s grafitnim plaštem, samo za horizontalni položaj zavarivanja istosmjernom strujom na pozitivnom polu ili izmjeničnom strujom pri naponu praznog hoda 75 V:

oznaka elektrode: E (NiFe) G 49

Potrebna jakost struje

Gole elektrode, elektrode s tankim plaštem i elektrode s jezgrom: promjer mm	jakost struje A	Elektrode s debelim plaštem: promjer mm	jakost struje A
2	50... 70	2	50... 80
3	90...130	2,5	60...110
4	140...190	3,25	90...160
5	190...250	4	130...200
6	240...330	5	180...260
		6	230...350

Priprema čelika za zavarivanje (neki slučajevi)

Slika	Debljina lima s mm	Razmak limova b mm	Promjeri elektrode mm: gole, s tankim plaštem, s jezgrom	Promjeri elektrode mm: s debelim plaštem
	1	0	2	2
	1,5	0,5	2	2
	2	1	2	2,5
	3	2	3	3,25
	4	2	4	4
	5	2	4	4
60 70°	5	1	4	3,25, 4
	6	1,5	4, 5	3,25, 4
	8	2	4, 5	3,25, 4, 5
	10	2	4, 5	3,25, 4, 5
	12	2	4, 5	3,25, 4, 5
	14	2	4, 5	4, 5, 6
	16	2	4, 5	4, 5, 6
70°	12	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	14	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	16	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	18	1,5	4, 5	4, 5, 6
	20	2	4, 5	4, 5, 6
	25	2	4, 5	–

Priprema rubova za zavarivanje čelika pri većim debljinama

Skica	Debljina lima s mm	Dubina otvora a mm	Dubina otvora b mm	Kut otvora α °	Kut otvora β °
	50	30	20	60	60
	60	36	24	60	60
	70	42	28	50	60
	80	48	32	50	60
	90	54	36	50	50
	100	60	40	50	50
	110	66	44	45	50
	120	72	48	45	50

Priprema rubova za zavarivanje za dvostruki U-zavar kod debelih ploča:

Debljina ploča s mm	Otvor utora a mm	Otvor utora b mm	Oblik utora x mm	Oblik utora y mm
140	60	16	20	8
			30	10
			40	12
160	70	18	50	14
			60	16
			70*	18*

Samo kod debljine ploča s = 160 mm.

Priprema čeličnih ploča za čelične konstrukcije

s mm	a mm
5	2
6	2...3

s mm	a mm	α°
8	2...3	30
10	3	35
12	3	35

s mm	a mm	α°	β°
15	3	30	30
18	3	30	35

Deformacije konstrukcija zbog skupljanja zavara

Uzdužna deformacija

Zavar ◺ a mm	Kut deform. α°
5	1
7	3
9	7
12,5	13

Izravnavanje deformacija

Upotrebljivost najznačajnijih postupka zavarivanja i rezanja plamenom

Način zavarivanja	Debljina mm za materijal: čelik	lake kovine	ostale kovine
čelno iskrenjem	(0,2...40000 mm²)	(do 10000 mm²)	Cu, mjed (do 500 mm²)
točkasto	2 × 12	2 × 5	Cu slit. 2 × 2
kolutno	0,1...2,5	0,1...1,5	Cu slit. 0,1...1,2
plamenom	1...40	2...40	Cu 2...30,
elektrolučno			
– s kovinskom elektr.	1...40 (...100)	2...25	Cu 2...30
– s ugljenom elektr.	1...40	2...12	Cu 2...15, Pb 2...8
– u argonu	–	1...20	–
– u vodiku	1...40	–	Cu slit. 1...10
– pod praškom	5...100	–	–
rezanje plamenom	0,5...500(...1000)	–	–

Zavarivanje plasta

Od plasta prikladni su za zavarivanje termoplasti i elasti, dok se duroplasti ne mogu zavarivati.

Plasti se zavaruju vrućim plinom (zrakom, dušikom), vrućim alatom, visokofrekventnom strujom, trenjem itd.

LEMLJENJE

Lemljenje (lotanje) je spajanje kovinskih dijelova pomoću lema kao dodatnog materijala. Pri lemljenju se lem rastali, dok se spajani dijelovi samo zagriju:

– do temperature pod talištem lema uz neposredno zagrijavanje lema (lemilom ili plamenikom),

– do temperature nad talištem lema pri posrednom zagrijavanju lema (umetnutog) putem ugrijanih spajanih dijelova.

Dodirne plohe spajanih dijelova čiste se mehanički, kemijski i pomoćnim sredstvima.

Meko lemljenje

Za meko lemljenje čelika i neželjeznih kovina upotrebljavaju se:

– meki lem (vidi str. 414),

– pomoćna sredstva: cinčani klorid $ZnCl_2$ (sa solnom kiselinom HCl), salmijak NH_4Cl, kolofonij.

Tvrdo lemljenje

Za tvrdo lemljenje čelika i neželjeznih kovina potrebni su:

– tvrdi lem, bakreni ili mjedeni (str. 414) ili srebrni lem (str. 415),

– pomoćna sredstva: borni spojevi (npr. boraks $Na_2B_4O_7 \cdot 10\ H_2O$) s dodacima fluorida, fosfata, silikata i sl.

Za lemljenje aluminija upotrebljavaju se posebni lemovi (str. 415), dok su talila fluoridi i kloridi lakih kovina (Li, Be).

LJEPLJENJE KOVINA

Ljepila za ljepljenje kovina:

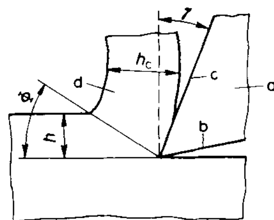
– anorganska ljepila (mineralnih, keramičkih ili staklastih sastavina) su postojanija pri višim temperaturama, ali su krhkija,

– organska ljepila (od naravnih ili umjetnih spojeva ugljikovodika, npr. epoksidne smole) vezuju fizikalno ili kemijski, žilavi su, no postojana su samo pri nižim temperaturama (do oko 150 °C).

Jednokomponentna ljepila su pripremljena kao pasta s prikladnim rastapalom, koje pri ljepljenju ishlapi, ili su suho umetnuta među spajanje plohe te lijepe pri dovođenju topline.

Pri *dvokomponentnim ljepilima* djeluje na ljepilo (kao pastu ili tekućinu) tik pred ljepljenjem primješani otvrđivač koji izaziva polimerizaciju ljepila, a time i njegovo očvršćivanje.

Osnovi



a – alat
b – stražnja ploha
c – prednja ploha
d – strugotina

Pri obradi materijala odvajanjem čestica nastaje strugotina debljine h_c, koja je veća od debljine rezanja h.

Faktor sabijanja iznosi

$$\Theta_h = h_c/h = \cos(\Phi - \gamma)/\sin\varphi > 1$$

gdje znače: φ – kut rezanja i γ – prednji kut alata.

$$\varphi = \text{arc tan}\,[\cos\gamma/(\Theta_h - \sin\gamma)]$$

Za $\gamma = 0°$ je $\varphi = \text{arc tan}\,[1/\Theta_h]$

Faktor sabijanja ovisi o brzini rezanja v_c.

*

Strugotina klizi po prednjoj plohi brzinom v_r, koja ovisi o brzini rezanja v_c, kutu rezanja φ i prednjem kutu γ

$$v_r = v_c \sin\varphi/\cos(\varphi - \gamma) = v_c/\Theta_h$$

Brzina deformacije materijala u ravnini rezanja iznosi

$$v_s = v_c \cos\gamma/\cos(\varphi - \gamma)$$

Pri obradi žilavih i mekih materijala redovno nastaje neprekinuta (tekuća) strugotina, dok je strugotina pri obradi krhkih materijala izlomljena i rastrgana. Neprekinuta strugotina nastaje ako materijal može postići neki minimalni stupanj deformacije.

*

Najveći se dio energije utrošen na oštrici alata za odvajanje strugotine pretvara u toplinu. Toplina nastaje:

– zbog kidanja atomskih veza u obrađivanom materijalu (u području rezanja),

– zbog trenja između alata (na stražnjoj plohi) i izratka te između alata (na prednjoj plohi) i strugotine.

Nastali toplinski tok iznosi

$$\Phi = A\, v_c\, k_c$$

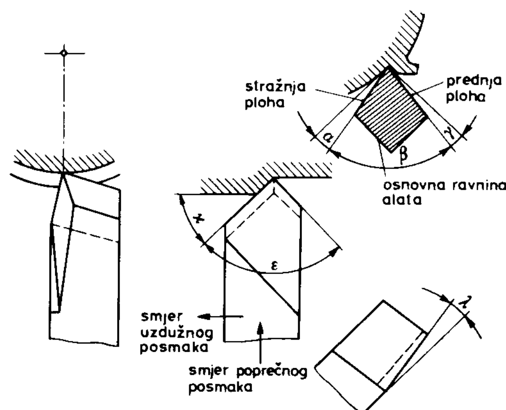
gdje su: A – presjek odvojenog materijala; v_c – brzina rezanja; k_c – specifična sila rezanja (sila po jedinici površine).

Toplinski tok koji zagrijava strugotinu iznosi

$$\Phi' = \Delta T \cdot A\, v_c \varrho c < \Phi$$

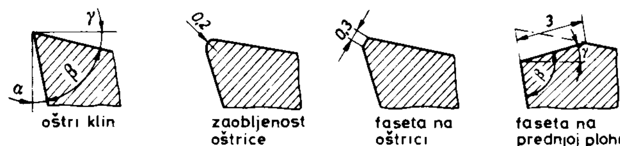
gdje su: $\Delta T = (T_2 - T_1)$ – temperaturna razlika između temperature strugotine T_2 i temperature materijala T_1, ϱ – gustoća; c – spec. topl. kapac. materijala.

Kutovi alata

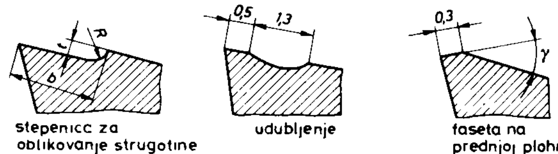


α — stražnji (slobodni) kut	γ — prednji (radni) kut	ε — vršni kut
β — kut klina	κ — postavni kut	λ — kut nagiba

Oblici oštrica

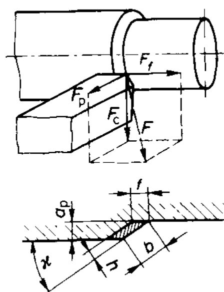


Pojačanje klina zaobljenjem, fasetom na oštrici ili fasetom na prednjoj plohi



Odvođenje strugotine olakšavamo stepenicom, udubljenjem ili fasetom na prednjoj plohi

Tokarenje



Sila rezanja alata F, koja mora svladati otpor rezanja materijala, rastavljamo u tri komponente:

- posmičnu silu F_f
- odrivnu silu F_p
- glavnu silu F_c

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_c^2}$$

Glavna sila F_c iznosi

$$F_c = k_{c\,1\times1}\, b\, h\,(h_s/h)^{c_c}$$

$$b = a/\sin\varkappa$$

$$h = f \sin\varkappa$$

gdje znače: $k_{c\,1\times1}$ – specifičnu silu rezanja, b – širinu rezanja, h – geometrijsku debljinu strugotine, h_s – standardnu debljinu strugotine 1 mm, a_p – dubinu rezanja, f – posmak, $\varkappa$ – postavni kut; c_c eksponent debljine, ovisan o materijalu.

Specifična sila rezanja $k_{c\,1\times1}$ i eksponent c_c

Obrađivani materijal	$k_{c\,1\times1}$ N/mm²	c_c	Obrađivani materijal	$k_{c\,1\times1}$ N/mm²	c_c
čelik					
Č.0545	1990	0,26	sivi lijev		
Č.0645	2110	0,17	SL 25	1160	0,26
Č.0745	2260	0,30	tvrdi lijev	2060	0,19
Č.1531	2220	0,14			
Č.1731	2130	0,18	bronca	1780	0,17
Č.4320	2100	0,26	mjed	780	0,18
Č.5421	2260	0,30	Al – slitine	640	0,25
Č.4731	2240	0,21	Mg – slitine	280	0,19
Č.4732	2500	0,26			

Za određivanje posmične sile F_f i odrivne sile F_p često upotrebljavamo omjer koji vredi za postavni kut $\varkappa$ = 45°:

$$F_f : F_p : F_c = 1 : 2 : 5$$

Uz drukčiji postavni kut $\varkappa'$, glavna sila F_c' iznosi

$$F_c' = F_c\left(\frac{\sin 45^\circ}{\sin\varkappa'}\right)^{c_c}$$

Kutovi oštrice i brzine rezanja pri tokarenju čelika alatom od tvrdog metala

Obrađivani materijal: vrsta	čvrstoća N/mm²	Vrsta reza[1]	Nož: tvrdi metal[2]	prednji kut i kut nagiba (°)[3] γ	γ_f	λ	Brzina rezanja $v_{c\,240}$[4] m/min pri posmaku f (mm/okr.) 0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
čelični lijev	< 520	m v	P 10 P 30	8 6	– −5	0...4 5...10	135 –	110 –	95 40	80 32	– 27
	520...700	m v	P 10 P 30	6 6	– −5	0...4 5...10	110 –	90 –	75 30	65 25	– 22
	> 700	m v	P 10 P 30	6 6	– −7	0...4 5...10	70 –	60 –	50 20	45 17	– 14
meki čelik	< 500	m v	P 10 P 30	15 12	– −3	0...4 5...10	250 –	210 –	180 85	150 70	– 60
polutvrdi čelik	500...700	m v	P 10 P 30	12 10	– −3	0...4 5...10	220 –	185 –	155 65	130 55	– 45
tvrdi čelik	700...1000	m v	P 10 P 30	10 8	– −3	4...6 5...10	165 –	135 –	110 45	85 35	– 25
legirani čelik	1000...1400	m v	P 10 P 30	6 6	0 −7	0...4 5...10	85 –	65 –	55 22	45 18	– 14
	1400...1800	m s	K 10 K 10	4 4	−3 −7	0...4 5...10	–	30	25	15	–
Mn tvrdi čelični lijev	–	m s	K 10 K 10	0 0	– −5	0...4 5...10	–	18	15	–	–
Mn tvrdi čelik kovani	–	m s	P 20 P 20	4 4	– −5	0...4 5...10	–	18	15	–	–
nerđajući čelik lijevani	600...700	m s	K 10 K 10	6 6	– −5	0...4 5...10	30	25	20	15	–
nerđajući čelik kovani	600...700	m s	P 10 P 20	12 12	– 0	0...4 5...10	80 –	65 40	50 30	45 25	– –
alatni čelik	1500...1800	m s	K 10 K 10	0 0	– −5	3...5 3...5	23	18	15	12	–

[1] m – mali presjek, neprekinuti rez s dubinom rezanja do 3 mm i posmakom do 0,3 mm; s – osrednji presjek, prekinuti rez s dubinom rezanja do 6 mm i posmakom do 0,6 mm; v – veliki presjek, prekinuti rez s dubinom rezanja do 10 mm i posmakom do 1,5 mm.

[2] Vrste tvrdih metala – vidi str. 390.

[3] Kutovi na alatu – vidi str. 633. – γ_f je kut fasete na prednjoj plohi, široke od 0,5 do dva posmaka. α = 8°. Kut fasete na stražnjoj plohi α_f = 6°.

[4] $v_{c\,240}$ – brzina rezanja za postojanost T = 240 min. Za drukčiju postojanost alata vrijede ovi omjeri brzina rezanja:

$$v_{c\,60} : v_{c\,240} : v_{c\,480} = 1{,}26 : 1 : 0{,}89$$

Kutovi oštrice i brzine rezanja pri tokarenju lijevanog željeza i neželjeznih kovina alatom od tvrdog metala

Obrađivani materijal		Vrsta reza[1]	Nož					Brzina rezanja v_c[4] m/min				
			tvrdi metal[2]	stražnji, prednji i nagibni kut (°)[3]				pri posmaku f (mm/okr.)				
vrsta	tvrdoća HB			α	α_f	γ	λ	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
sivi lijev	...200	m v	K 20 K 20	7 7	5 5	6 6	0...4 5...7	75	70	65	50	45
	200...250	m v	K 10 K 10	7 7	5 5	6 3	0...4 5...7	45	40	35	30	27
sivi lijev legirani	250...400	m v	K 10 K 10	6 6	4 4	0 0	0...4 5...7	23	21	20	18	16
bijeli tempero-vani lijev	–	m v	K 10 P 20	7 7	5 5	6 0	0...4 5...7	65 70	55 60	45 50	40 45	– –
crni tempero-vani lijev	–	m v	K 10 K 10	7 7	5 5	6 0	0...4 5...7	45	40	35	28	–
bakar, mjed	35...40	m s	K 20	12	10	≈ 15	−5	150...300		120...200		
mjed, bronca	45...85	m s	K 20	10	8	≈ 12	0	150...400		120...250		
	85...200	m s	K 20	8	6	≈ 8	0...3	200...400		150...250		
aluminij, Al-slitine	...60	m s	K 20	10	8	≈ 28	0	...2300		...1500		
Al-slitine	60...110	m s	K 20 K 10	8	6	≈ 16	0	250...700		150...500		
Al-slitine <13,5% Si	–	m s	K 10	8	6	≈ 11	0	100...500		80...150		
Al-slitine >13,5% Si	–	m s	K 05	8	6	≈ 8	0	70...120		50...90		

[1] m – mali presjek, jednoliki rez s dubinom rezanja do 3 mm i posmakom do 0,3 mm; s – osrednji presjek, mali prekidi reza s dubinom rezanja do 6 mm i posmakom do 0,6 mm; v – veliki presjek, tvrda mjesta ili prekidi reza s dubinom rezanja do 10 mm i posmakom do 1,5 mm.

[2] Vrste tvrdih metala – vidi str. 390.

[3] Kutovi oštrice noža – vidi str. 633. – α_f je kut fasete na stražnjoj plohi oštrice. (Faseta pod kutom γ_f na prednjoj plohi nije potrebna.)

[4] Navedene brzine rezanja v_c vrijede za sivi i temperovani lijev kao brzine rezanja $v_{c\,240}$ pri postojanosti $T = 240$ min. Za drukčiju postojanost alata vrijede ovi omjeri brzina rezanja:

$$v_{c\,60} : v_{c\,240} \; v_{c\,480} = 1{,}5 : 1 : 0{,}85$$

Blanjanje i dubljenje

Pri *blanjanju* se giba stol s izratkom pravocrtno prema suportu s nožem; pri *dubljenju* (horizontalnom ili okomitom) giba se suport s nožem pravocrtno prema stolu s izratkom. Pri gibanju stola odn. noža za dubljenje razlikujemo:

- radni hod pri gibanju napred – nož reže
- povratni hod pri gibanju natrag – nož ne reže.

Prosječna brzina gibanja stola odn. noža za dubljenje iznosi

$$v_m = 2\, v_d v_p / (v_d + v_p)$$

gdje su: v_d – brzina rezanja pri radnom hodu, v_p – brzina pri povratnom hodu.

Glavna sila rezanja (pri blanjanju ili dubljenju) iznosi

$$F_c = k_{c\,1\times1}\, b(h_s/h)^{c_c} \qquad b = a/\sin \varkappa \qquad h = f \sin \varkappa$$

gdje su: $k_{c\,1\times1}$ – specifična sila rezanja, b – širina rezanja, h – debljina rezanja, h_s – standardna debljina rezanja 1 mm, a – dubina rezanja, f – posmak (pri dvojnom hodu), $\varkappa$ – postavni kut, c_c – eksponent debljine ovisan o materijalu.

Za specifičnu silu rezanja $k_{c\,1\times1}$ i eksponent c_c valja odabrati iste vrijednosti kao pri tokarenju (vidi str. 634).

Kutovi na noževima od tvrdog metala ili brzoreznog čelika i brzine rezanja pri blanjanju ili dubljenju čelika i sivog lijeva

Obrađivani materijal		Nož			Brzina rezanja $v_{c\,240}$ m/min[3]		
vrsta	čvrstoća R_m N/mm² tvrdoća HB	rezni[1] materijal	kutovi (°)[2]		pri posm. f mm		
			γ	γ_f	0,5	1,0	1,6
meki čelik	400...500	P 40 h. j.	15...20 12	0...− 5 –	60 28	48 23	40 20
polutvrdi čelik	500...800	P 40 h. j.	12...15 8...10	−5...−10 –	55 21	45 17	38 15
tvrdi čelik	750...900	P 40 h. j.	10...20 8	0...− 5 –	40 14	35 11	30 10
sivi lijev	140...180 HB	K 20 h. j.	15...20 4	0...− 5 –	50 25	40 18	30 14
sivi lijev	200...220 HB	K 20 h. j.	10...15 4	−5...−10 –	55 32	45 26	35 24

[1] Vrste tvrdih metala (P 40, K 20) – vidi str. 390! »h. j.« brzorezni čelik vrhunskog kvaliteta – vidi str. 383!

[2] Kut nagiba $\lambda = -6 \ldots -15°$

[3] $v_{c\,240}$ je brzina rezanja pri postojanosti alata $T = 240$ min. Uz drugu postojanost alata vrijede odnosi brzina rezanja:

pri obradi čelika $v_{c\,60} : v_{c\,240} : v_{c\,480} = 1{,}26 : 1 : 0{,}84$
pri obradi sivog lijeva $v_{c\,60} : v_{c\,240} : v_{c\,480} = 1{,}5 : 1 : 0{,}85$

Bušenje i razvrtavanje

Vijačno svrdlo* reže s dvije oštrice. Prostorna krivulja po kojoj su smještene oštrice je zavojnica.

Kut uspona zavojnice i *vršni kut* svrdla ovise o materijalu koji treba obraditi.

Obrađivani materijal	Kut uspona λ(°)	Vršni kut φ(°)
čelik – čvrstoće R_m < 700 N/mm²	30	118
– čvrstoće R_m > 700 N/mm²	25	118
– za poboljšanje, legirani	35...40	118
sivi lijev	30	118
bakar, bronca	40	140
mjed	18...20	130
Al – slitine	40...45	140
Mg – slitine	40...45	100

Presjek odreska

– za jednu oštricu $A_1 = df_z/2 = df/4$

– za obje oštrici $A = df_z = df/2$

pri čem su: d – promjer svrdla, f_z – posmak za oštricu, f – posmak (za 1 okretaj svrdla).

Sila rezanja za oštrice

$$F_{cz} = df_z k_c/2 = dfk_c/4$$

gdje je k_c specifična sila rezanja (za jedinicu presjeka).

Obrađivani materijal	k_c (N/mm²) pri f (mm/okr.)					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
čelik R_m > 900 N/mm²	5000	4600	4300	4000	3750	3500
Č.0745	4000	3700	3450	3200	3000	2850
Č.0645	3700	3450	3200	3000	2850	2700
Č.0545	3300	3050	2850	2650	2500	2350
Č.0245	2700	2450	2250	2050	1900	1750
sivi lijev, tvrdi	2100	1900	1700	1500	1350	1200
meki	1700	1500	1300	1150	1000	900
bakar, bronca	1800	1600	1400	1250	1100	1000
Al – slitine	1350	1150	1000	850	750	650
Mg – slitine	900	750	650	550	475	400

* Naziv »spiralno« svrdlo, kako se često naziva, nije ispravan.

Bušenje svrdlima od brzoreznog čelika

Obrađivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min	Brzina vrtnje n i posmak f	Promjer svrdla d (mm)					
			6,3	10	16	25	40	63
čelik 500 N/mm²	35,5	n okr./min	1800	1120	710	450	280	180
		f mm/okr.	0,16	0,20	0,25	0,32	0,40	0,50
čelik 700 N/mm²	22,4	n okr./min	1120	710	450	280	180	112
		f mm/okr.	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25	0,32
legirani čelik	11,2	n okr./min	560	355	224	140	90	56
		f mm/okr.	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25
sivi lijev do SL 20	28,0	n okr./min	1400	900	560	355	224	140
		f mm/okr.	0,18	0,22	0,28	0,36	0,45	0,56
sivi lijev do SL 25	18,0	n okr./min	900	560	355	224	140	90
		f mm/okr.	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,45

Razvrtavanje razvrtalima od brzoreznog čelika

Obrađivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min	Brzina vrtnje n i posmak f	Promjer razvrtala* d (mm)					
			6,3	10	16	25	40	63
čelik do 700 N/mm²	7,0	n okr./min	355	224	140	90	56	35,5
		f mm/okr.	0,45	0,56	0,71	0,90	1,10	1,40
čelik iznad 700 N/mm²	2,24	n okr./min	112	71	45	28	18	11,2
		f mm/okr.	0,20	0,25	0,31	0,40	0,50	0,63
sivi lijev do 200 HB	11,2	n okr./min	560	355	224	140	90	56
		f mm/okr.	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40
sivi lijev iznad 200 HB	5,6	n okr./min	280	180	112	71	45	28
		f mm/okr.	0,45	0,56	0,71	0,90	0,10	1,40
bakar i bakrene slitine	14,0	n okr./min	710	450	280	180	112	71
		f mm/okr.	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40
lake kovine	22,5	n okr./min	1120	710	450	280	180	112
		f mm/okr.	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40

* Odstupanje od promjera: −0,2 mm za promjere 6,3 i 10 mm
−0,3 mm za promjere 16 i 25 mm
−0,4 mm za promjere 40 i 63 mm

Rezanje navoja na tokarilicama (i revolverskim tokarilicama) alatom od brzoreznog čelika

Obrađivani materijal	Brzina rezanja v_c (m/min)					
	ureznici i nare- znice	automatska navojna glava — korak navoja P (mm)				tokarski ili navoj. nož
		6...4,5	4...3	2,5...1,75	1,5...1	
sivi lijev	2...5	2...3	2,5...4	3...4,5	4...5	9...12
temperovani lijev	2...5	3...6	4...8	6...10	8...12	9...12
čelični lijev	2...5	1,5...3	2...4	3...5	4...6	9...12
čelik						
340 N/mm²	3...9	4...5	4...8	5...10	6...12	14...18
420 N/mm²	3...7	4...5	4...8	5...10	6...12	12...16
500 N/mm²	2...5	2...3	3...4	4...5	4...6	10...14
600 N/mm²	2...4	2...3	3...4	4...5	4...6	9...12
CrNi, CrMo	1...3	1...2	1...3	1,5...3,5	2...4	8...10
bronca	2...5	2...3,5	2,5...4	3...4,5	3,5...5	6...8
crveni lijev	3...8	4...6	5...8	6...9	8...12	12...14
mjed	4...12	4...8	6...10	8...12	10...20	25...34
Al-slitine	20	25	25	25	25	30...40
Mg-slitine	30	30	40	40	40	40

Piljenje kovina

Piljenje okvirnim pilama

Čvrstoća obrađivanog materijala N/mm²	Brzina rezanja v_c m/min		Broj hodova (dvojnih) u min — pri hodu pile (mm)		
	srednja	najveća	140	150	160
... 700	30	47	108	98	93
700...1000	20	32	73	67	63
1000...1300	14	22	50	47	43

Piljenje tračnim pilama

Obrađivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min	Obrađivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min
sivi lijev*	20...30	bakar	80
konstrukcijski čelik	60	mjed, crveni lijev	100
alatni čelik	20...30	lake kovine	400...1200

* Priljevci s grubom, tvrdom korom.

Piljenje kružnim pilama

Obrađivani materijal	Hladno rezanje		Vruće rezanje	
	brzina rezanja v_c m/min	brzina posmaka v_f mm/min	brzina rezanja v_c m/min	brzina posmaka v_f mm/min
sivi lijev	15...45	20...55		
čelik	30...55	35...60		
mjed, bronca	100...200	100...300	...6000	50...250
lake kovine	400...600	100...300		

Glodanje

Glodanje povezuje kružno gibanje glodala (brzina rezanja) i pravocrtno gibanje izratka (posmak). Glodanje može biti obodno ili čeono.

Pri obodnom glodanju razlikujemo protusmjerno glodanje (glodanje protivno smjeru posmaka) i istosmjerno glodanje (glodanje u smjeru posmaka).

Brzina rezanja iznosi $v_c = d\pi n$

gdje su: d – promjer glodala, n – brzina vrtnje trna glodala.

Posmak za svaki zubac glodala

$$f_z = f/z_f n$$

gdje znače: f – brzinu posmaka, z_f – broj zubaca glodala.

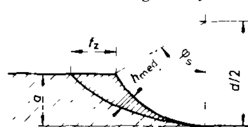
Prosječna glavna sila pri glodanju

$$F_{z\,med} = b\,h_{med}\,k_{c\,1\times1}(h_s/h_{med})^{c_c} \cdot z_i$$

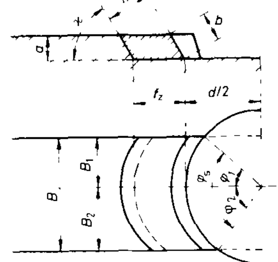
gdje su: $k_{c\,1\times1}$ – specifična sila rezanja, b – geometrijska širina strugotine, h_{med} – prosječna geometrijska debljina strugotine, h_s – standardna debljina strugotine 1 mm, z – eksponent debljine, ovisan o materijalu, z_i – prosječni broj zubiju glodala koji režu u zoni kuta $\hat{\varphi}_s$ (rad).

$z_i = z_f\,\hat{\varphi}_s/2\pi \qquad \hat{\varphi}_s = \pi/180° \cdot \varphi_s°$

Obodno glodanje



Čeono glodanje



$b = B$

$h_{med} = 2\,a s_z/\hat{\varphi}_s d$

$\varphi_s = \arccos\,(1 - 2a/d)$

a – dubina glodanja

d – promjer glodala

B – širina obrađivane plohe

$b = a/\sin\varkappa$

$h_{med} = s_z \sin\varkappa/d \cdot (B_1/\hat{\varphi}_1 + B_2/\hat{\varphi}_2)$

$\varphi_1 = \arcsin\,(2B_1/d)\quad \varphi_2 = \arcsin\,(2B_2/d)$

Obrađivani materijal	$k_{c\,1\times1}$ N/mm²	c_c	Obrađivani materijal	$k_{c\,1\times1}$ N/mm²	c_c
čelik Č.0545	2050	0,26	čelik Č.4320	2200	0,26
Č.0645	2200	0,17	Č.5421	2300	0,30
Č.0745	2200	0,20	Č.4731	2300	0,21
Č.1531	2300	0,14	Č.4732	2600	0,26
Č.1731	2200	0,18	sivi lijev	1050	0,26
			tvrdi lijev	2100	0,19

Smjernice za broj zubaca na glodalu od brzoreznog čelika (za obradu normalnih materijala)

Glodalo	Broj zubaca glodala za promjer glodala (mm) 20	30	40	50	60	75	90	110	130	150	200
za duge rupe	2	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
vretenasto	6	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—
valjkasto	—	—	6	6	6	6	8	8	10	10	—
valjkasto-čeono	—	—	8	8	8	10	12	12	14	16	—
kutno čeono	—	—	10	12	14	16	18	20	22	24	—
pločasto											
— ravno ozupčano	—	—	—	8	8	10	12	12	14	16	18
— križno ozupčano	—	—	—	10	10	12	14	14	16	18	20
profilno, zatokareno	—	—	8	10	10	10	12	14	16	18	—
odvaljno	—	—	—	12	10	10	9	9	9	8	8
za utore T	8	10	12	12	—	—	—	—	—	—	—
za navoje											
— ravno ozupčano	8	12	14	16	18	20	—	—	—	—	—
— vijčano ozupčano	—	10	12	14	16	18	—	—	—	—	—
pilasto	—	—	—	—	34	40	44	50	52	56	64
glodalne glave (s noževima)	—	—	—	—	—	—	—	8	10	10	12

Općenito je za obradu žilavih i tvrdih materijala potrebno više zubaca, a za lake kovine manje nego za normalne materijale.

Smjernice za kutove na glodalima od brzoreznog čelika i glodalnim glavama s noževima od tvrdih metala

(α — stražnji kut, γ — prednji kut, λ — kut nagiba)

Obrađivani materijal	Glodala od brzoreznog čelika: vretenasta α	γ	λ	valjkasta α	γ	λ	pločasta — križno ozupčana α	γ	λ	glave s noževima α	γ	λ	Glodalne glave s noževima od tvrdog metala α	γ	λ
sivi lijev	7	12	30	6	12	40	6	12	15	6	15	12	5	12	0
tvrdi lijev	4	8	15	4	8	30	3	6	10	3	5	5	3	8	—5
temperni lijev	6	12	30	5	12	40	5	12	20	5	12	12	4	10	+5
čelični lijev	6	10	30	5	12	40	5	10	20	5	10	7	4	10	+5
čelik															
600 N/mm²	8	15	30	7	15	45	7	15	20	7	15	15	6	15	+10
900 N/mm²	7	10	20	6	12	40	6	12	15	6	10	20	4	10	+5
1000 N/mm²	6	6	15	5	8	35	5	7	10	5	6	7	3	6	+5
bakar	6	12	45	6	20	45	6	15	20	6	25	15	6	15	+20
mjed	6	12	35	6	15	45	6	15	20	6	8	12	4	12	+12
bronca	6	10	30	5	12	40	6	12	15	6	15	12	3	10	—5
Al-slitine	10	25	40	8	25	50	8	25	30	8	25	20	8	25	+30
Mg-slitine	10	25	40	8	25	50	8	25	30	8	30	25	8	25	+30

Brzine rezanja v_c (m/min) *pri protusmjernom glodanju*

Obrađivani materijal	Glodala od brzoreznog čelika: vretenasta	valjkasta, pločasta	valjkasto-čeona	glave s noževima	Glodalne glave s noževima od tvrdog met.
sivi lijev					
SL 20	16...25	14...20	16...22	17...25	60...100
SL 25	10...16	10...16	12...17	12...18	30...50
čelični lijev					
ČL. 0500	14...22	12...18	14...20	15...22	60...100
čelik					
500 N/mm²	18...28	16...24	18...28	20...30	120...200
600 N/mm²	18...28	16...24	18...28	18...28	100...160
700 N/mm²	17...25	15...20	17...23	16...24	80...120
Č. 1530	18...26	16...22	18...25	18...28	100...160
Č. 4730	14...20	12...18	14...20	15...22	60...100
Č. 4732	12...20	11...18	12...20	14...22	40...70
bakar	30...50	30...50	40...50	40...60	100...200
mjed	40...60	30...50	40...60	50...70	150...200
bronca (Sn)	30...40	25...40	40...50	40...60	100...150
aluminij	300...400	250...300	300...400	400...500	800...1000
alumin. slitine	200...250	140...180	200...250	300...400	600...800
magnez. slitine	300...400	300...400	400...500	400...500	800...1000

Posmaci za svaki zubac glodala f_z (mm/zubac) *pri protusmjernom glodanju*

Obrađivani materijal	Glodala od brzoreznog čelika: vretenasta	pločasta	valjkasta	valjkasto-čeona	glave s noževima	Glodalne glave s noževima od tvrdog met.
sivi lijev						
SL 20	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,1
SL 25	0,02	0,05	0,1	0,15	0,1	0,05
čelični lijev						
ČL. 0500	0,04	0,06	0,15	0,2	0,2	0,08
čelik						
500 N/mm²	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,1
600 N/mm²	0,05	0,06	0,15	0,2	0,3	0,1
700 N/mm²	0,03	0,06	0,1	0,15	0,2	0,08
Č. 1530	0,03	0,07	0,2	0,2	0,3	0,1
Č. 4730	0,03	0,06	0,1	0,15	0,2	0,08
Č. 4732	0,02	0,05	0,08	0,1	0,15	0,06
bakar	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,12
mjed	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,12
bronca (Sn)	0,04	0,06	0,15	0,2	0,2	0,1
aluminij	0,05	0,07	0,15	0,2	0,2	0,1
alumin. slitine	0,03	0,06	0,15	0,15	0,15	0,07
magnez. slitine	0,04	0,07	0,1	0,15	0,1	0,06

Brušenje

Osnovni su načini brušenja:

– po obliku izratka: vanjsko kružno brušenje, nutarnje brušenje i plosno brušenje

– po obliku brusa: profilno brušenje.

Brus je sastavljen od zrnaca brusnog sredstva različite veličine koja su međusobno spojena vezivom. Brus je određen geometrijskim oblikom i dimenzijama, brusnim sredstvom, kvalitetom zrna, vezivom, tvrdoćom i strukturom.

Brzina brušenja (rezanja) v_c je zbroj obodne brzine brusa v_b i brzine posmaka v_f (pri kružnom ili plosnom brušenju)

$$v_c = v_b + v_f \qquad v_b = d_b \pi n_b$$

gdje znače: d_b – promjer brusa (brus na mehanički pogon ili brusno kolo naziva se još i tociljem ili tocilom), n_b – brzinu vrtnje brusa.

Posmična brzina vrtnje izratka (pri kružnom bušenju $v_f = v_o$) iznosi

$$v_o = d_o \pi n_o$$

gdje su: d_o – promjer izratka, n_o – brzina vrtnje izratka.

O posmičnoj brzini vrtnje izratka uvelike ovisi kvaliteta brušenja i trošnje brusa.

Najvažnija sredstva za brušenje

Materijal	Kem. sastav	Tvrdoća (Mohs)	Upotreba
smirak	60...65% Al_2O_3	8	meki čelik, temper. lijev
korund			
naravni	90...96% Al_2O_3	9	žilavi čelici
normalni	95...98% Al_2O_3	9	tvrdi čelici, čelični lijev
plemeniti	nad 99% Al_2O_3	9	tvrdi čelici, brušenje alata
silicijev karbid	SiC (krist.)	> 9	sivi lijev, tvrdi lijev, tvrdi metali, meke kovine, ugljen, staklo, kamenština
borov karbid	B_4C (krist.)	> 9	tvrdi metali
dijamant	C (krist.)	10	tvrdi metali, staklo, kamenština

Veličina brusnog zrna određena je brojem očica sita za zrna na duljini 25 mm, a finog zrna i praha ispiranjem i otpuhivanjem.

Kvaliteta zrna	Oznaka zrna	Kvaliteta zrna	Oznaka zrna
vrlo grub	8 10 12	fin	70 80 90 100 120
grub	14 16 20 24	vrlo fin	150 180 200 220 240
osrednji	30 36 46 50 60	prah	280 320 400 500 600

Smjernice za izbor veličine zrna:

prvo brušenje	20...36
konačno brušenje	46...80
fino brušenje	100...200
najfinije brušenje	220...600

Veziva (ljepila) za brusove su:

mineralna (magnezitna, silikatna),
keramička – za jako pečene brusove (vrlo prikladne poroznosti),
vegetabilna (guma, ulje, šelak), koja su osobito elastična.

Vrsta veziva	Standardna oznaka	Vrsta veziva	Standardna oznaka
keramičko	V	magnezitno	O
umjetne smole	B	silikatno	S
šelak (naravne smole)	E	guma	R

Tvrdoćom brusa označujemo otpor veziva prema ljuštenju zrna iz brusa.

Stupanj tvrdoće	Oznaka tvrdoće	Upotreba
vrlo mek	EFG	plošno brušenje čelika
mek	HIJK	kružno brušenje sivog lijeva i kaljenog čelika
polutvrd	LMNO	kružno brušenje mekog i srednjetvrdog čelika, brušenje alata
tvrd	PRS	ručno brušenje tokarskih noževa, brušenje listova pila
vrlo tvrd	TUV	brušenje većih predmeta, grubo brušenje tvrdih i oštrih rubova
osobito tvrd	XYZ	brušenje čeličnih kugli

Struktura označuje sastav brusa, tj. volumenske udjele zrna, veziva i pora u brusu

$$V_z + V_v + V_p = 100\%$$

gdje znače u postocima: V_z – volumenski udio zrna, V_v – volumenski udio veziva, V_p – volumenski udio pora.

Vrsta strukture	gusta	osrednja	rijetka
Oznaka strukture	1 2 3	4 5 6	7 8 9

Maksimalne brzine brušenja (obodne brzine brusova)

Vezivo	Način brušenja	Maksimalna obodna brzina $v_{c\,maks}$ m/s			
		za brusne ploče $d_b \leqq 150$ mm		za brusne ploče $d_b > 150$ mm	
		ravne i približno ravne	ostale	ravne i približno ravne	ostale
mineralno	ručno	15	15	15	12
	strojno	25	20	20*	15
keramičko vegetabilno umjetne smole	ručno	30	25	25	20
	strojno	35	30	30	25

* Maksimalna obodna brzina velikih brusnih ploča ($d_b > 1000$ mm) smije dostići najviše 15 m/s pri ručnom i strojnom brušenju.

*Obodne brzine brusova od korunda**, koje su najprikladnije za brušenje raznih materijala

Obrađivani materijal	Obodne brzine v_c (m/s)**					
	za brušenje					
	vanjsko	nutarnje	plošno	alata	za čišćenje	za rezanje
sivi lijev	25	25	20	–	25	45...80
čelik	30	25	25	25	< 45	45...80
tvrdi metali	8	8	8	12	–	45...80
lake kovine	35	25	30	–	–	45...80

* Za brusove od silicijeva karbida prikladnije su nešto manje brzine nego za brusove od korunda. – ** Brušenje brzinom većom od maksimalno dopuštene $v_{c\,max}$ (vidi gornju tablicu) dopušteno je samo specijalnim brusovima koji su posebno ispitani za te brzine, a i tada samo na specijalnim brusilicama.

Svaki brus djeluje pri većim obodnim brzinama tvrđe, a pri manjima mekše.

Posmična brzina vrtnje izratka v_0 pri kružnom brušenju

Obrađivani materijal	Posmična brzina vrtnje v_0 (m/s)		Obrađivani materijal	Posmična brzina v_0 (m/s)	
	vanjsko brušenje	nutarnje brušenje		vanjsko brušenje	nutarnje brušenje
sivi lijev			crveni lijev		
grubo brušenje	0,25	0,35	grubo brušenje	0,3	0,5
fino brušenje	0,125		fino brušenje	0,25	
čelik			lake kovine		
grubo brušenje	0,25	0,3	grubo brušenje	1,0	0,6
fino brušenje	0,125		fino brušenje	0,6	

Posebne obrade

Obrada dijamantima

Dijamant je alat za finu obradu lakih kovina, bakrenih i cinčanih slitina te sivog lijeva, a dijelom i kaljenog čelika (za obradu mekog čelika nije prikladan). Dijamantom obrađujemo također tvrdu gumu, ljepenku i izolacijske materijale. Zbroj kutova $\alpha + \beta + \gamma$ iznosi redovno 90°. Za negativan prednji kut γ može biti $\beta \geqq 90°$.

Honanje (vlačno glačanje)

Kao alat služe posebna premjestiva držala na koja su prilijepljeni brusovi (3...10) finoga zrna u keramičkom vezivu ili vezivu od umjetne smole. Brzina brušenja iznosi 10...20 m/s, a posmak 16...20 m/min. Potrebno je intenzivno hlađenje rijetkim uljem ili petrolejem. Točnost obrade iznosi do 0,01 mm.

Lepanje (glačanje brusnim prahom)

Lepanje je konačna obrada izratka nakon odgovarajuće prethodne obrade. Alati za lepanje su od različitih kovina (sivog lijeva, bakra, bakrenih slitina, bijele kovine, antimona, olova). Kao sredstvo za lepanje upotrebljava se kromov oksid, prah korunda ili pak dijamanta. Ta se sredstva miješaju s uljem, petrolejem, mašću ili sl. Postiže se granična točnost u tolerancijama od $\pm$ 5 μm.

Superfiniš

Alat se sastoji od više brusova, vrlo fine kvalitete zrna (100...1000) i guste strukture, koji pri relativno malom pritisku na obrađivanu površinu osciliraju (pri pomaku od 2...10 mm s 200...2100 pomaka u minuti) u aksijalnom smjeru izratka (koji se okreće). Potrebno je intenzivno hlađenje (petrolej s dodacima). Postiže se hrapavost od 0,2...0,5 μm.

Ultrazvučna obrada kovina

Proces se osniva na erozivnom djelovanju što ga izazivaju mali, veoma tvrdi i oštrobridni kristali brusnog sredstva (u prostoru između alata i izratka) na koje djeluju visokofrekventni mehanički titraji alata. Alat može u izratku izdupsti oblik koji točno odgovara njegovu profilu. Obrada je upotrebljiva za najtvrđe i krhke materijale.

Elektroerozivna obrada kovina

Pri toj obradi nema djelovanja mehaničkih sila. Čestice se materijala odstranjuju djelovanjem električnog izbijanja između dviju elektroda, od kojih je jedna alat (bakar, mjed), a druga izradak. Visoka temperatura i tlak što nastaju pri električnom izbijanju u vrlo malom prostoru izazivaju raspršivanje sitnih čestica materijala, pri čemu elektrode također djelomice ispare. Erozivni učinak većih uređaja (snage do 15 kW) iznosi oko 500...800 mm³/min pri obradi čelika, a 80...100 mm³/min pri obradi tvrdih metala.

Postojanost alata

Alat za rezanje izvrgnut je za vrijeme rada mehaničkim, tolinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice, tj. njezinu istrošenost.

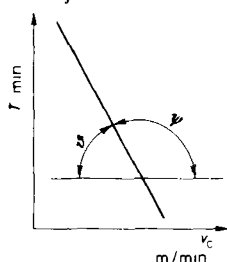
Istrošenost je najveća na onim mjestima alata koja su u neposrednom dodiru s izratkom odnosno strugotinom, tj. na prednjoj i stražnjoj plohi. Glavni su uzroci trošenju alata:

– plastična deformacija alata zbog utjecaja temperature,

– izlomljenost alata kao posljedica utjecaja dinamičkog opterećenja pri odvajanju strugotine koje prelazi titrajnu čvrstoću alata na savijanje,

– gubitak materijala u obliku mikroskopski malih čestica koje odlaze dijelom sa strugotinom, a dijelom ostaju prilijepljene uz površinu izratka.

Postojanost alata T je istrošenošću određeno trajanje oštrice između dvaju brušenja.



T i v_c: u logaritamskoj podjeli!

Postojanost T – po iskustvu – ovisi u prvom redu o brzini rezanja v_c

$$T = m/v_c^{\,c}$$

gdje su m i c konstante.

Logaritmiranjem dobivamo oblik

$$\lg T = \lg m - c \lg v_c$$

što u dijagramu s logaritamskom podjelom odgovara jednadžbi pravca.

Krivulja postojanosti (ili krivulja $T - v_c$) prikazuje ovisnost postojanosti T o brzini rezanja v_c.

Povećava li se brzina rezanja v_c postojanost alata opada.

Brzini rezanja v_{c1} odgovara postojanost T_1, brzini rezanja v_{c2} postojanost T_2:

$$T_1 = m/v_{c1}^{\,c} \qquad T_2 = m/v_{c2}^{\,c}$$

odakle proizlazi da konstanta c odgovara nagibu pravca (u dijagramu s logaritamskom podjelom), tj. kvocijentu

$$c = (\lg T_1 - \lg T_2)/(\lg v_{c2} - \lg v_{c1}) = \tan\vartheta = -\tan\psi \qquad \psi = 180° - \vartheta$$

Iz poznate brzine rezanja v_{c60} pri postojanosti T_{60} izračunavamo brzinu rezanja v_{ct} pri drukčijoj postojanosti T_t pomoću jednadžbe

$$v_{ct} = v_{c60}\sqrt[c]{T_{60}/T_t}$$

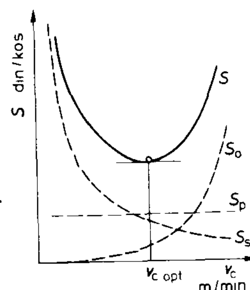
*

U tablicama na str. 635 ... 643 navedene su brzine rezanja za alat od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Slojem titanovog nitrida na oštrici može se pod određenim uvjetima postići višestruko povećana postojanost.

Optimalna brzina rezanja

Troškove obrade za jedan izradak S (din/kom.) možemo podijeliti na pojedinačne troškove S_p, opće troškove S_s i troškove alata S_0.

$$S = S_p + S_s + S_0$$



Pojedinačni troškovi S_p (npr. troškovi transporta i upinjanja izratka i sl.) ovise samo o izratku i ne mijenjaju se s brzinom rezanja v_c.

Opći troškovi S_s (npr. troškovi za radilicu – otpis, uzdržavanje, energija, – troškovi osobnih dohodaka, upravni troškovi i sl.) su – reducirani na pojedini izradak – to manji, na što su veći broj izradaka podijeljeni, dakle koliko je kraće vrijeme obrade; stoga se s povećanjem brzine rezanja v_c znatno smanjuju.

Troškovi alata S_0 ovise o postojanosti alata T pa se zato s brzinom rezanja v_c jako povećavaju.

Troškove alata S_0 izračunavamo iz jednadžbe

$$S_0 = (V_n - V_i + i_b S_b)/n_t = (V_n - V_i + i_b S_b)/n_T(i_b + 1)$$

pri čemu su: V_n – cijena novog alata, V_i – cijena istrošenog alata, S_b – troškovi jednokratnog brušenja, i_b – broj brušenja do istrošenosti alata, n_t – broj svih izradaka u vremenu t trajnosti alata, n_T – broj izradaka u vremenu T postojanosti alata.

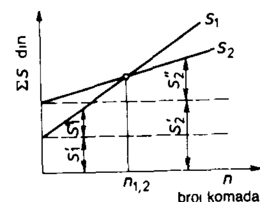
Broj svih izradaka u_t ovisan je prije svega od materijala alata i izratka te o brzini rezanja v_c, posmaka f i dubine rezanja a.

Optimalna brzina rezanja v_{copt} je ona brzina rezanja, pri kojoj su troškovi izrade S za jedan izradak najniži.

Izbor optimalnog tehnološkog postupka

Izradak možemo obraditi različitim tehnološkim operacijama (npr. tokarenjem ili glodanjem; na univerzalnom ili serijskom stroju itd.).

Za obavljanje svake tehnološke operacije potrebni su neki stalni troškovi S', neovisni o broju komada, te posebni troškovi S'', ovisni o pojedinom komadu te stoga rastu s njihovim brojem.



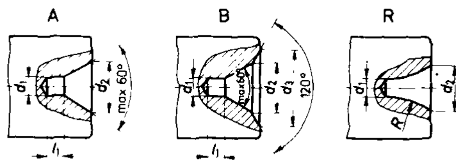
Ukupni su troškovi

$$\sum S = S' + S''$$

Desna slika prikazuje troškove S_1 i S_2 za 2 različita tehnološka postupka (1 i 2). Do broja komada $n_{1,2}$ jeftiniji je postupak 1, a dalje postupak 2.

Središnja gnijezda

Gnijezda sa središnjim kutom 60° (JUS M.A5.210 — 1972)

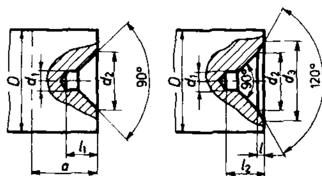


Mjere u mm

Nazivni* promjer d_1	l_1 min.	d_2	d_3	R min.	R maks.
(0,5)	0,8	1,06	—	—	—
(0,63)	0,9	1,32	—	—	—
(0,8)	1,1	1,70	—	—	—
1,0	1,3	2,12	3,15	2,5	3,15
(1,25)	1,6	2,65	4	3,15	4,0
1,6	2,0	3,35	5	4,0	5,0
2,0	2,5	4,25	6,3	5,0	6,3
2,5	3,1	5,30	8	6,3	8,0
3,15	3,9	6,70	10	8,0	10,0
4,0	5,0	8,50	12,5	10,0	12,5
(5,0)	6,3	10,60	16	12,5	16,0
6,3	8,0	13,20	18	16,0	20,0
(8,0)	10,1	17,0	22,4	20,0	25,0
10,0	12,8	21,2	28	25,0	31,5

* Treba se kloniti vrijednosti u zagradama.

Gnijezda sa središnjim kutom 90° (JUS M.A5.211 — 1953) upotrebljavaju se za dijelove s masom većom od 100 kg i pri obradi velikim silama.



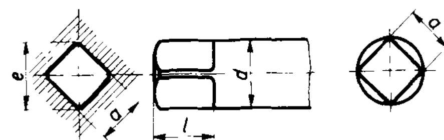
Mjere u mm

Promjer D	d_1	d_2	d_3	l_1	l_2	l ≈	a*
25)...63	3	9	12,5	4,5	5,5	1	8
63)...100	5	13	18	6,5	8	1,5	11
100)...160	8	22	29	11	13	2	18

* Mjere za mjesto reza na predmetu na kojem ne smije ostati gnijezdo.

Četverobridi za alat

(JUS K.A2.001 - 1969)



Mjere u mm

Promjeri drška* d preporučeni	Promjeri drška* d mogući	Četverobrid a	Četverobrid l	Promjeri drška* d preporučeni	Promjeri drška* d mogući	Četverobrid a	Četverobrid l
(1.12)	1.06)... 1,18	0,9	4	(11,2)	10,6)... 11,8	9	12
1,25	1,18)... 1,32	1	4	12,5	11,8)... 13,2	10	13
(1,4)	1.32)... 1,5	1,12	4	(14)	13.2)... 15	11,2	14
1,6	1.5) ... 1,7	1,25	4	16	15) ... 17	12,5	16
(1,8)	1,7) ... 1,9	1,4	4	(18)	17) ... 19	14	18
2	1,9) ... 2,12	1,6	4	20	19) ... 21,2	16	20
(2,24)	2,12)... 2,36	1,8	4	(22,4)	21,2)... 23,6	18	22
2,5	2,36) .. 2,65	2	4	25	23,6)... 26,5	20	24
(2,8)	2,65)... 3	2,24	5	(28)	26,5)... 30	22,4	26
3,15	3) ... 3,35	2,5	5	31,5	30) ... 33,5	25	28
(3,55)	3,35).. 3,75	2,8	5	(35,5)	33,5)... 37,5	28	31
4	3,75). 4,25	3,15	6	40	37,5)... 42,5	31,5	34
(4,5)	4,25)... 4,75	3,55	6	(45)	42,5)... 47,5	35,5	38
5	4,75)... 5,3	4	7	50	47,5)... 53	40	42
(5,6)	5,3) ... 6	4,5	7	(56)	53) ... 60	45	46
6,3	6) ... 6,7	5	8	63	60) ... 67	50	51
(7,1)	6,7) ... 7,5	5,6	8	(71)	67) ... 75	56	56
8	7,5) ... 8,5	6,3	9	80	75) ... 85	63	62
(9)	8,5) ... 9,5	7,1	10	(90)	85) ... 95	71	68
10	9,5) ...10,6	8	10	100	95) ...106	80	75

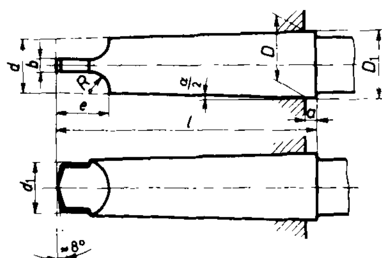
* Preporučeni promjeri bez zagrada smatraju se osnovnima (u nizu standardnih brojeva R 10), a preporučeni promjeri u zagradama su pomoćni (u nizu standardnih brojeva R 20).

Na dršcima promjera do 3 mm prelazi četverobrid redovno u središnji vršak, a na dršcima promjera većeg od 3 mm nalazi se na kraju četverobrida središnje gnijezdo oblika A (vidi str. 650).

Konični dršci za alat

Morseov konus	0	1 : 19,212 = 0,05205
	1	1 : 20,047 = 0,04988
	2	1 : 20,020 = 0,04995
	3	1 : 19,922 = 0,05020
	4	1 : 19,254 = 0,05194
	5	1 : 19,002 = 0,05263
	6	1 : 19,180 = 0,05214
Metrički konus		1 : 20 = 0,05

Vanjski konusi (JUS K.D0.011 – 1982)

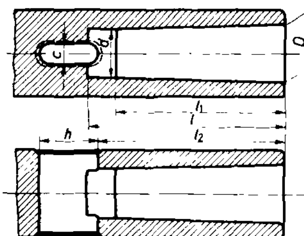


Konus		$\frac{\alpha}{2}$	Mjere u mm							
			D	D_1 ≈	d ≈	d_1 maks.	l maks.	e maks.	R	a
Morseov	0	1°29′27″	9,045	9,2	6,1	6	59,5	10,5	4	3
	1	1°25′43″	12,065	12,2	9	8,7	65,5	13,5	5	3,5
	2	1°25′50″	17,780	18	14	13,5	80	16	6	5
	3	1°26′16″	23,825	24,1	19,1	18,5	99	20	7	5
	4	1°29′15″	31,267	31,6	25,2	24,5	124	24	8	6,5
	5	1°30′26″	44,399	44,7	36,5	36	156	30	11	6,5
	6	1°29′36″	63,348	63,8	52,4	51	218	44	17	8
metrički	80	1:20 = 0,05 1°25′56″	80	80,4	69	67	228	48	24	8
	100		100	100,5	87	85	270	58	30	10
	120		120	120,6	105	102	312	68	36	12
	(140)		140	140,7	123	120	354	78	42	14
	160		160	160,8	141	138	396	88	48	16
	(180)		180	180,9	159	156	438	98	54	18
	200		200	201	177	174	480	108	60	20

Osim takvih koničnih držaka upotrebljavaju se i dršci koji na čelu imaju navoj za vijak:

konus	navoj	konus	navoj
Morse 1	M 6	metrički:	
2	M 10	80	M 30
3	M 12	100, 120, 140	M 36
4	M 16	160, 180, 200	M 48
5	M 20		
6	M 24		

Unutarnji konusi (JUS M.G0.051 — 1968)

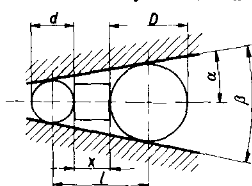


Konus		Mjere u mm						
		D	d	l_1	l min.	l_2	c	h
metrički	4	4	3	20	25	21	2,2	8
	6	6	4,6	28	34	29	3,2	12
Morseov	0	9,045	6,7	45	52	49	3,9	15
	1	12,065	9,7	47	56	52	5,2	19
	2	17,780	14,9	58	67	62	6,3	22
	3	23,825	20,2	72	84	78	7,9	27
	4	31,267	26,5	92	107	98	11,9	32
	5	44,399	38,2	118	135	125	15,9	38
	6	63,348	54,8	164	188	177	19	47
metrički	80	80	71,5	170	202	186	26	52
	100	100	90	200	240	220	32	60
	120	120	108,5	230	276	254	38	70
	(140)	140	127	260	312	286	44	80
	160	160	145,5	290	350	321	50	90
	(180)	180	164	330	388	355	56	100
	200	200	182,5	350	424	388	62	110

MJERENJE KUTOVA I KONUSA

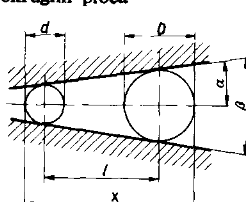
Mjerenje kutova

Određivanje kutova pomoću dviju okruglih ploča



$$\sin\alpha = \frac{D-d}{2x+(D+d)}$$

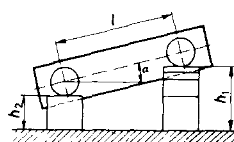
$$x = \frac{D(1-\sin\alpha)-d(1+\sin\alpha)}{2\sin\alpha}$$



$$\sin\alpha = \frac{D-d}{2x-(D+d)}$$

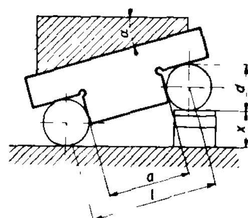
$$x = \frac{D(1+\sin\alpha)-d(1-\sin\alpha)}{2\sin\alpha}$$

Sinusov postupak



$$\sin\alpha = \frac{h_1-h_2}{l}$$

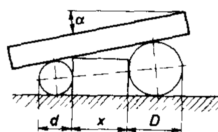
$$h_1-h_2 = l\sin\alpha$$



$$\sin\alpha = \frac{x}{l} = \frac{x}{a+d}$$

$$x = l\sin\alpha = (a+d)\sin\alpha$$

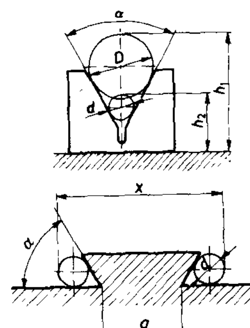
Tangensov postupak



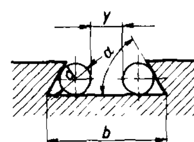
$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{D+d+2x}$$

$$x = \frac{D-d}{2}\cot\frac{\alpha}{2} - \frac{D+d}{2}$$

Mjerenje kutnih vodilica



$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{2(h_1-h_2)-(D-d)}$$

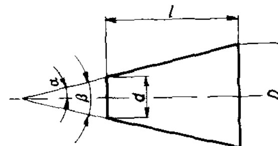


$$x = a + d\left(1+\cot\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$y = b - d\left(1+\cot\frac{\alpha}{2}\right)$$

Mjerenje konusa

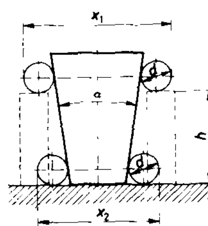
Koničnost obično izražavamo omjerom



$$\frac{(D-d)}{l} = 1:k$$

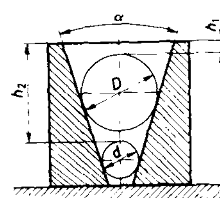
$$\tan\alpha = \frac{D-d}{2l} = \frac{1}{2k}$$

Vanjski konus



$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{x_1-x_2}{2h}$$

Unutarnji konus



$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{2(h_2-h_1)-(D-d)}$$

KOROZIJA I POVRŠINSKA ZAŠTITA

Korozija

K o r o z i j a je nenamjerni kemijski ili elektrokemijski utjecaj na materijal pri čemu se mijenja njegova struktura od površine prema unutrašnjosti.

Kemijske reakcije javljaju se u prvom redu pri djelovanju električki nevodljivim tvarima (npr. pri suhim plinovima) na materijal; *elektrokemijske reakcije* izazivaju električki vodljive tvari (npr. vodljive tekućine – elektroliti).

Prema nastajanju korozije razlikujemo:

– jednoliku koroziju koju u prvom redu izazivaju kemijske reakcije, a pojavljuje se na cjelokupnoj površini predmeta,

– lokalnu koroziju koju većinom izazivaju elektrokemijske reakcije, a ograničena je na određena manja mjesta na predmetu.

J e d n o l i k a k o r o z i j a može neograničeno napredovati, ako produkti korozije po nastajanju smjesta odlaze s materijala (ako se ljušte, tope, otpadaju) čime omogućuju daljnje korozijsko djelovanje (npr. oksidacija željeza pri visokim temperaturama ili razjedanje Cu s talinom SN). Jednolika korozija se zaustavlja, ako se produkti korozije tijesno i čvrsto priljube uz osnovni materijal te ga zaštićuju pred daljnom korozijom (npr. zaštitni sloj na površini pri Pb, Al, Cu ili – nevidljivo tanak – i pri Ni, Cr itd.).

Primjeri otpornosti nekih kovinskih materijala prema jednolikoj koroziji

Upliv korozije	Kovinski materijal (sastav u postocima)								
	Fe	Cr	Ni	Fe + 18 Cr 8 Ni	Al	Al + 10 Si	Cu	Cu + 8 Sn	Ni + 30 Cu
Voda									
destilirana	–	++	++	++	+–	++	+	+	++
meka	+–	++	++	++	+–	++	+	+	++
tvrda	+	++	++	++	++	++	+	+	++
morska	–	+	++	+	–	++	–	+	++
Plinovi									
norm. atmosfera	+	++	++	++	++	++	+	++	++
morski zrak	+–	+	+	+	–	++	–	+–	+
dimni plinovi	+–	++	–	++	++	++	–	+–	++
pregr. para	+–	++	++	++	–	++	–	+	++
Kiseline									
HNO_3 – 10%	––	+	––	++	+	++	–	–	+
– konc.	++	++	––	++	++	++	––	––	+
HCl – 0,5%	––	+–	++	+	––	++	–	+–	+
– konc.	––	–	––	––	––	+	––	–	+
H_2SO_4 – 10%	––	+	+–	++	–	+	+	+	++
– konc.	+–	+	+–	++	––	++	–		
Lužine									
KOH – 20%	++	+	++	++	––	++	+	+	++
NaOH – 20%	++	+	++	++	––	++	+–	+	++

Ocjene korozijske otpornosti: ++ vrlo dobra, + dobra, +– osrednja, – loša, –– vrlo loša.

L o k a l n a k o r o z i j a je većinom elektrokemijska pojava pri kojoj dvije kovine, različnih elektrokemijskih potencijala, u dodiru s vodljivom tekućinom (elektrolitom) tvore galvanski članak.

Elektrokemijski naponski niz kovina sastavljen je po njihovim normalnim potencijalima s obzirom na normalnu vodikovu elektrodu:

Kovina	Normalni potencijal V	Kovina	Normalni potencijal V	Kovina	Normalni potencijal V
Ka	– 2,92	Fe II	– 0,44	H	± 0,00
Na	– 2,71	Cd	– 0,40	Cu II	+ 0,34
Mg	– 2,35	Co	– 0,27	Cu III	+ 0,52
Al	– 1,28	Ni	– 0,25	Ag	+ 0,81
Mn	– 1,08	Sn	– 0,14	Hg	+ 0,85
Zn	– 0,76	Pb	– 0,13	Pt	+ 0,87
Cr	– 0,56	Fe III	– 0,04	Au	+ 1,50

Kovine manjeg potencijala nazivamo »manje plemenitim«, a one većeg potencijala »plemenitijima«.

Zbog elektrokemijskog potencijala poteče u galvanskom članku tok elektrona od anode ka katodi. Anoda (manje plemenita kovina) se pritom rastvara (korozija!), a katoda (plemenitija kovina) se prekriva (zaštita).

Raznoliki elektrokemijski potencijal može proizaći iz dviju kovina, dviju faza iste kovina, razlici u strukturi, razlici napetosnog stanja itd. Što veća je potencijalna razlika, to veća će biti lokalna korozija.

Velika otpornost kovina ili njihovih slitina prema jednolikoj (kemijskoj) koroziji ne štiti ih pred lokalnim (elektrokemijskom) korozijom.

Površinska zaštita

Pred jednolikom (kemijskom) korozijom štitimo kovinske dijelove prikladnim otpornim materijalom.

Ako upotreba nekog prema koroziji otpornog materijala nije prikladna (zaradi čvrstoće, temperaturne otpornosti – ili cijene) dolaze u obzir postupci prevlačenja površinskim slojem: platiranje (npr. Ni na osnovu Fe), potapljanje (u cink, kositar, olovo), galvaniziranje (niklovanje, kromiranje), navarivanje, sinterovanje, metaliziranje (Zn, Al, Pb, Cu, Cr, Ni), prskanje plazmom i sl.

Zaštita kemijskim postupcima su: bruniranje, fosfatiranje, bondiranje itd.

Prekrivna zaštita su: ulja, masti, premazi, ocakline i plasteni lakovi.

Pred lokalnom (elektrokemijskom) korozijom najlakše je štititi kovinske predmete u suhom prostoru, gdje ne postoji mogućnost stvaranja elektrolita. Ako to nije moguće (na slobodnom prostoru, u vlažnim prostorijama i sl.), treba posebno zaštititi spojeve kovinskih dijelova od vlage. Jednostavno je sredstvo debeo namaz mašću. Značajan je i razuman izbor dvaju dijelova u dodiru (kako bi se smanjila elektrokemijska potencijalna razlika). Velikom otpornošću prema koroziji odlikuju se plasti. Stoga pri potrebi naročite otpornosti prema koroziji rješenje treba tražiti u potpuno plastenoj konstrukciji (ili njenim dijelovima).

RAZNO

TEHNIČKO PISMO

Zbog preglednosti tehničkog tiska i razlikovanja znakova za veličine i drugih znakova pišu se:

- nagnuto znakovi veličina
- uspravno ostali znakovi.

*

U zapadnonjemačkim standardima (DIN 1338) je određeno što valja pisati (tiskati) uspravno, a što nagnuto, i to:

a) Uspravno se pišu:
- brojevi napisani brojkama, npr. $1{,}32 \cdot 10^{-6}$, 3/4, 625-puta, $6\,r^2$, a_6
- posebni brojevi, označeni brojkama: Ludolfov broj π, osnova prirodnih logaritama e, imaginarna jedinica i ($\mathrm{i}^2 = -1$)
- matematički znakovi određenog značenja, npr.: d, ∂, Δ, ∫, ∑, lim, sin, cos, tan, cot, log, ln, lg
- znakovi mjernih jedinica i njihovi mnogokratnici: m (metar), C (kulon, coulomb), F (farad), μ (mikro = 10^{-6}), μF (mikrofarad), mol
- simboli kemijskih elemenata: Fe, H_2O, NaCl

b) Nagnuto *(kurzivno)* se pišu:
- brojevi napisani slovima: a, b, x, y, n-puta, $\sqrt[n]{3}$, $\sum_{i=1}^{n} k_i$, $i = 1 \ldots n$
- svi simboli fizikalnih veličina: *m* (masa), *C* (kapacitet), *F* (sila), *μ* (koeficijent trenja)
- matematičke oznake funkcija: $f(x), g(x), \varphi(x), \mu(x), L(y) = y'' + f_1 y' + f_0 y$

Indeksi veličina pišu se uspravno ako su to samo dodatne oznake veličina, npr.:

α_{l} – određeni kut, p_{k} – kritični tlak, v_{max} – najveća brzina, σ_{dop} – dopušteno naprezanje;

nagnuto (*kurzivno*) se pišu kada znače slovima napisane brojčane vrijednosti ili veličine:

k_n – za $n = 1, 2, 3, \ldots$, $w_x = \partial w/\partial x$ – komponenta brzine u smjeru osi x; σ_z – naprezanje u smjeru osi z, $V_{p_1 T_1}$ – volumen pri tlaku p_1 i temperaturi T_1.

Normalni formati papira

Oznaka	Površina m^2	Mjere mm
A0	1	841 × 1189
A1	1/2	594 × 841
A2	1/4	420 × 594
A3	1/8	297 × 420
A4	1/16	210 × 297
A5	1/32	148 × 210
A6	1/64	105 × 148

Normalni se formati upotrebljavaju za sve tehničke crteže, za službene dopise i različite tiskanice. Formati se mogu upotrebljavati uzdužno ili poprečno. Za crtanje uskih i dugačkih predmeta, objekata i sličnoga dopušta se produženi format, sastavljen od jednakih ili susjednih formata. Okvir crteža odmaknut je od ruba papira 5 mm.

Dimenzije formata redova B i C:

Red B:	oznaka	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
	mjere (mm)	125 ×	176 ×	250 ×	353 ×	500 ×	707 ×	1000 × 1414
Red C:	oznaka	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
	mjere (mm)	114 ×	162 ×	229 ×	324 ×	458 ×	648 ×	917 × 1297

Mjerila

Crteže treba raditi samo u standardnim mjerilima:

za naravnu veličinu	1 : 1		
za smanjenja	1 : 2,5 (1 : 2)	1 : 5	1 : 10
	1 : 20	1 : 50	1 : 100
	1 : 200	1 : 500	1 : 1000
za povećanja	2 : 1	5 : 1	10 : 1

Treba se kloniti vrijednosti u zagradama.

Grčka slova

α	*A*	alfa	*η*	*H*	eta	*ν*	*N*	ni	*τ*	*T*	tau
β	*B*	beta	*ϑ*	*Θ*	t(h)eta	*ξ*	*Ξ*	ksi	*υ*	*Y*	ipsilon
γ	*Γ*	gama	*ι*	*I*	jota	*ο*	*O*	omikron	*φ*	*Φ*	fi
δ	*Δ*, Δ	delta	*ϰ*	*K*	kapa	*π*, π	*Π*	pi	*χ*	*X*	hi
ε	*E*	epsilon	*λ*	*Λ*	lambda	*ϱ*	*P*	ro	*ψ*	*Ψ*	psi
ζ	*Z*	(d)zeta	*μ*, μ	*M*	mi	*σ*	*Σ*, Σ	sigma	*ω*	*Ω*, Ω	omega

Rimske brojke

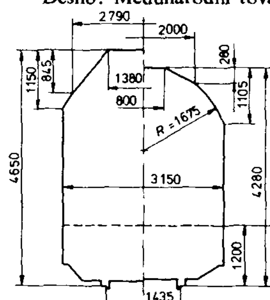
I = 1	VIII = 8	LX = 60	CD = 400
II = 2	IX = 9	LXX = 70	D = 500
III = 3	X = 10	LXXX = 80	DC = 600
IV = 4	XX = 20	XC = 90	DCC = 700
V = 5	XXX = 30	C = 100	DCCC = 800
VI = 6	XL = 40	CC = 200	CM = 900
VII = 7	L = 50	CCC = 300	M = 1000

TOVARNE MJERE ŽELJEZNIČKIH KOLA

Tovarne mjere za kola na prugama normalnog kolosijeka (1435 mm)

Lijevo: Tovarni profil Jugoslavenskih željeznica (JŽ)[1]

Desno: Međunarodni tovarni profil UIC[2] (JUS P.A0.004 — 1972)



Najveće mjere tovara:

širina	do 3150 mm
visina	do 3080 (3450) mm
duljina	do 7,7 (...22) m
masa	do 15 (...80) t

Gornji rub tovarne platforme

Gornji rub tračnice

Tovarna širina je ograničena razmakom osovina, tj. razmakom osovina pri dvoosovinskim kolima odnosno razmakom među čepovima obrtnih postolja pri četveroosovinskim kolima. Pri razmaku osi većem od 8 m postoji ograničenje tovarne širine u sredini razmaka osi (na svakoj strani):

razmak osi m:	8	9	10	11	12	13	14	16	18	20	22	24	26	28	30
ograničenje cm:	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	27	35	43	52	62

Tovarna širina kola

Vrsta kola	otvorena	pokrivena	plitka (plato)
dvoosovinska	7,7 m i više	9 m i više	> 12 m
četveroosovinska (s obrtnim postoljima)	12 m i više	15 m i više	> 18 m

Opterećenje pruge

Kategorija pruge	Osovinsko opterećenje	Duljinsko opterećenje
A (A', A'')	12...16 t	3,5...4,8 t/m
B (B_1, B_2)	18 t	5,0...6,4 t/m
C (C_2, C_3, C_4)	20 t	6,4...8,0 t/m

Nosivost kola

dvoosovinska kola	20 t i više
četveroosovinska kola (s obrt. postoljima)	40 t i više*

Za sve prevoze posebnih predmeta (po mjerama i masi) potreban je dogovor sa željezničkom upravom.

[1] Za pruge Postojna—Sežana i Pivka—Rijeka vrijedi međunarodni profil UIC.

[2] UIC = *Union International des Chemins de fer.*

* Specijalna četveroosovinska: do 58 t, šesteroosovinska: do 80 t.

JUGOSLAVENSKI STANDARDI — JUS

Jugoslavenski se standardi označuju oznakama od dva slova i četiri brojke (npr. »JUS A.A0.001«). Slovima se označuju grane i glavne skupine standarda; prvom brojkom skupine standarda, a posljednjim trima brojkama pojedini standardi.

Grane i glavne skupine jugoslavenskih standarda

A. Osnovni i opći standardi
- A.A Osnovni standardi o standardizaciji, standardni brojevi, jedinice itd.
- A.C Terminologija, dokumentacija
- A.D Knjigovodstvo
- A.E Organizacija upravljanja
- A.F Obrada informacija
- A.K Kvalitet i atestiranje proizvoda

B. Rudarstvo i prerada minerala, ugljena i nafte

C. Metalurgija i tehnologija prerade kovina
- C.A Osnovni i opći standardi za granu metalurgije i tehnologije prerade kovina
- C.B Osnovni proizvodi crne metalurgije
- C.C Osnovni proizvodi od lakih kovina i njihovih slitina
- C.D Osnovni proizv. od bakra i drugih teško taljivih kovina i njihovih slitina
- C.E Proizvodi od cinka, olova i drugih lako taljivih kovina i njihovih slitina
- C.G Proizvodi od plemenitih kovina i njihovih slitina
- C.H Izvedeni proizvodi crne i obojene metalurgije
- C.J Ljevaonički proizvodi crne i obojene metalurgije
- C.K Proizvodi crne metalurgije s posebnom namjenom
- C.L Proizvodi obojene metalurgije s posebnom namjenom
- C.T Tehnološki procesi prerade kovina
- C.Z Razni standardi na području metalurgije i tehnologije prerade kovina

D. Šumarstvo, drvna industrija i prerada drvnih tvari

E. Poljoprivreda, ribarstvo i prehrambena industrija

F. Tekstilna industrija

G. Industrija kože, gume i umjetnih masa

H. Kemijska industrija

K. Radai i mjerai alat i pribor
- K.A Osnovni i opći standardi o alatu
- K.B Čekići, sjekire, budaci, ćuskije i sličan alat za kovanje, cijepanje i slične radnje udarcima
- K.C Noževi, škare, sjekala, dlijeta, kose, srpovi, ašovi, motike i sličan alat za sječenje jednom ili dvjema oštricama

K.D Pile, glodala, svrdla, turpije i sličan rezni alat s više oštrica
K.E Probojci, šila, igle i sličan alat za probijanje
K.F Alat za brušenje i glačanje
K.G Kliješta, stege, ključevi i sličan alat za hvatanje i stezanje
K.H Kalupi za kovanje i prešanje, probijanje i sličan alat za oblikovanje; ploče za ravnanje, obilježavanje i slično
K.J Lopate, vile, grablje, žlice i sličan alat za grabljanje i hvatanje
K.L Četke, češljevi i sličan alat za struganje, glađenje i razmazivanje
K.M Posebni alat i pribor za kovinoprerađivačku djelatnost
K.N Posebni alat i pribor za preradu drva i drvnih tvari
K.P Posebni alat i pribor za poljoprivredu, šumarstvo, lov i ribarstvo te za industriju hrane i pića
K.R Posebni alat i pribor za razne industrijske i zanatske djelatnosti
K.T Mjerni alat za gruba mjerenja
K.Z Razni alat i pribor

L. Mjerni aparati i proizvodi precizne mehanike

L.C Aparati za mjerenje duljine, površine, obujma, kutova i slično
L.D Aparati za mjerenje duljine, težine, tlaka, sile, napona i slično
L.E Aparati za mjerenje vremena, brzine, prijeđenog puta, izvršenog rada i sl.
L.F Aparati za mjerenje temperature i ostala toplinska mjerenja
L.G Aparati za električna mjerenja
L.J Aparati za razna tehnička i laboratorijska mjerenja
L.K Optički aparati opće namjene
L.M Medicinski i kirurški instrumenti i aparati
L.N Aparati za regulaciju temperature, vlažnosti i slično
L.R Pisaći i računski strojevi, aparati za umnožavanje i ostali aparati birotehnike i široke potrošnje

M. Strojogradnja i industrija kovina

M.A Osnovni i opći standardi za granu strojogradnje i industrije kovina
M.B Vijci, zakovice i ostali elementi za spajanje
M.C Elementi strojeva
M.D Radni strojevi i uređaji univerzalnog tipa
M.E Termoenergetski uređaji
M.F Strojevi za transformaciju energije
M.G Strojevi i uređaji za obradu kovina skidanjem strugotine
M.J Posebni strojevi, uređaji i drugi kovinski proizvodi za rudarstvo i industriju mineralnih proizvoda te za građevinarstvo
M.K Strojevi, uređaji i razni kovinski proizvodi za šumarstvo, drvnu industriju i preradu drvnih tvari
M.L Strojevi, uređaji i razni kovinski proizvodi za poljoprivredu, prehrambenu industriju, kemijsku industriju i industriju nafte

M.M Strojevi, uređaji i razni kovinski proizvodi za industriju vlaknastih tvari, kože, gume, smole i plastičnih masa
M.N Cestovna vozila
M.R Kovinski namještaj, strojevi i kovinski proizvodi za grafičku industriju, kovinski proizvodi za uredske i školske potrebe te za ugostiteljstvo i kućanstvo
M.T Kovinski proizvodi za vatrogastvo i službu zdravstvene zaštite
M.Z Razni strojevi, uređaji i ostali kovinski proizvodi

N. Elektrotehnika i elektroindustrija

N.A Osnovni i opći standardi iz elektrotehnike i elektroindustrije
N.B Proizvodnja, prijenos i razdioba električne energije
N.C Električni vodiči
N.E Materijal za električne instalacije
N.F Materijal za električne, nadzemne i podzemne vodove niskog i visokog napona
N.G Električni rotacijski strojevi
N.H Transformatori, usmjerači i slični uređaji
N.J Elementi, akumulatori i kondenzatori
N.K Naprava za uključivanje
N.L Električne žarulje i svjetiljke
N.M Elektrotehnički proizvodi za potrebe kućanstva
N.N Elektronika i telekomunikacije
N.P Električna aparatura na vozilima
N.R Sastavni dijelovi za elektroniku i telekomunikacije
N.S Posebni električni strojevi, uređaji i aparati za industrijske i medicinske svrhe

P. Uređaji, postrojenja i vozila tračničkog prometa

P.A Osnovni i opći standardi o uređajima, postrojenjima i vozilima tračničkog prometa
P.B Postrojenja gornjeg stroja tračničkog prometa
P.C Signalno-sigurnosna postrojenja tračničkog prometa
P.F Zajednički elementi tračničkih vozila
P.G Kočni uređaji tračničkih vozila
P.J Parne lokomotive
P.N Putnička, poštanska i četveroosovinska službena kola
P.P Teretna i dvoosovinska službena kola
P.R Vagoneti i motorna kolica
P.S Tračnička vozila posebne namjene

R. Brodogradnja i postrojenja riječnog i pomorskog prometa

R.F Propulzijska brodska sredstva

U. Građevinarstvo

Z. Standardi, koji ne ulaze ni u jednu posebnu granu standardizacije

IZGOVARANJE STRANIH IMENA

Stranim imenima dodan je p r i b l i ž a n izgovor, transkribiran samo našim slovima.

Bach	bah	Martin	martèn
Bain	béin	Mayer	májer
Baumé	bomé	Maxwell	méksvel
Beaufort	bofór	Mishima	mišíma
Becquerel	békerel	Mohr	mor
Bernoulli	bernúli	Mollier	móljer
Bessemer	bésemer	Moody	múdi
Böhler	béler	Newton	njutn
Bohr	bor	Oersted	érsted
Boltzmann	bólcman	Ohm	om
Boyle	bojl	Otto	óto
Briggs	brigs	Pascal	paskál
Brinell	brinél	Péclet	peklé
Carnot	karnó	Pelton	peltn
Charpy	čárpi	Poiseuille	poazèj
Clapeyron	klápejron	Poisson	poasón
Clausius	kláuzius	Prandtl	prantl
Colebrooke	kóulbruk	Redwood	redvúd
Coulomb	kulón	Renard	renár
Cremona	kremóna	Reynolds	rénelds
Culmann	kúlman	Richter	rihter
Curie	kirí	Rockwell	rókvel
Curtis	kértis	Rose	róze
D'Alembert	dalambèr	Rosin	rózin
Dalton	doltn	Röntgen	réntgen
Darcy	darsí	Sankey	sénki
Descartes	dekárt	Saybolt	séjbolt
Diesel	dízl	Schmidt	šmit
Einstein	ájnštajn	Seale	síl
Euler	ójler	Shore	šor
Fahrenheit	fárnhajt	Siemens	símens
Faraday	féredi	Sievert	sívert
Fehling	féling	Smith	smit
Francis	frénsis	Stauffer	štáufer
Gauss	gáus	Stefan	štéfan
Gay-Lussac	gejlisák	Steiner	štájner
Giorgi	džórdži	Student	stjúdent
Grasshof	gráshof	Taylor	téilr
Gray	grej	Thomas	tómas
Guldin	guldín	Thomson	tómsn
Henry	hénri	Torricelli	toričéli
Hertz	herc	Vickers	víkers
Hooke	huk	Warrington	uóringtn
Joule	džul	Watt	uót
Kirchhoff	kírhhof	Wheatstone	vítstoun
Laplace	laplás	Wöhler	véler
Mariotte	marıót	Wood	vud

IZVORI BROJČANIH PODATAKA

U prvim izdanjima priručnika brojčani su podaci sabrani iz slijedećih djela:

Techniques de l'Ingénieur
Généralités, tomes I, II et III
Mécanique et Chaleur, tomes I et II
Métallurgie, tomes I, II et III
Naklada: Techniques de l'Ingénieur, Paris.

Hütte, Des Ingenieurs Taschenbuch
Herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, E. V. in Berlin,
Band I: Theoretische Grundlagen (HÜTTE I).
Band II A: Maschinenbau, Teil A (HÜTTE II A).
Band II B: Maschinenbau, Teil B (HÜTTE II B).
Band V: Verkehrstechnik-Vermessungstechnik (HÜTTE V).
Naklada: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.

Hütte, Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebshütte)
Herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, E. V. in Berlin,
Band I: Fertigung.
Band II: Betrieb.
Naklada: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.

Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau
Band I und II.
Naklada: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

Машиностроение: Энциклопедический справочник
Том 1 и 2: Инженерные расчёты в машиностроении.
Том 3 и 4: Материалы машиностроения.
Naklada: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва.

Schmidt, E.: Properties of Water and Steam in SI-Units
Naklada: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

Standardi
JUS – Jugoslavenski standardi.
ISO – International Standardizing Organization.
DIN – Deutsche (Industrie-) Norm.

*

U novom, potpuno preređenom izdanju priručnika – osim prijašnjih – uzeti su u obzir najnoviji podaci iz zakona o mjernim jedinicama i mjerilima te iz (dostupne) suvremene znanstvene i stručne literature – iz knjiga i revija.

KAZALO

Znak: 8806 P

Izdanje

STROJARSKI PRIRUČNIK
Deveto prerađeno i popunjeno
hrvatsko ili srpsko izdanje

Autor

Univ. prof. u m.
dipl. ing. BOJAN KRAUT
zaslužni profesor Fakultete za strojništvo
Univerze Edvarda Kardelja u Ljubljani,
počasni doktor Univerze u Mariboru

Preveo sa slovenskoga

Dipl. ing. MIROSLAV PEČORNIK
umirovljeni profesor Tehničkog fakulteta
Sveučilišta Vladimir Bakarić u Rijeci

Izdavač

IRO TEHNIČKA KNJIGA
OOUR IZDAVAČKA DJELATNOST
Zagreb, Jurišićeva 10

Za izdavača odgovara

Ing. ZVONIMIR VISTRIČKA

Urednik izdanja

Ing. SREĆKO ŠOŠTARIĆ

Naklada

20 000 primjeraka

Tisak

Tiskarna Ljudske pravice u Ljubljani
Tisak dovršen u lipnju 1988.

YU ISBN 86-7059-063-8